

Міністерство освіти та науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Передавальні та приймальні пристрої
(кредитний модуль: “Передавальні та приймальні пристрої”)

Методичні вказівки
до проведення практичних занять
для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
спеціалізацій «Інформаційно-телекомунікаційні технології»

*Затверджено Вченою радою ІТС КПІ ім. Ігоря
Сікорського*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

“Передавальні та приймальні пристрої” [Текст]: метод. вказівки до проведення практичних занять для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізацій «Інформаційно-комунікаційні технології», / Уклад.: Г.Л.Авдеєнко, О.Ф.Цуканов. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 116 с.

*Гриф надано Вченою радою ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського
(Протокол № 1 від 25.01.2021 р.)*

Навчальне видання

Передавальні та приймальні пристрої
(кредитний модуль «Передавальні та приймальні пристрої»)

Методичні вказівки

до проведення практичних занять
для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
спеціалізацій «Інформаційно-комунікаційні технології»,

Укладач: Авдеєнко Г.Л., Цуканов О.Ф. к.т.н.

Відповід редактор:

Рецензенти: В.В.Максимов

ЗМІСТ

Вступ	4
Загальні вказівки до виконання практичних занять.....	5
Практичне заняття № 1. Основні відомості про радіопередавальні пристрої.....	6
Практичне заняття № 2. Структурні схеми радіоприймачів. Коефіцієнт шуму та чутливість радіоприймача. Односигнальна та багатосигнальна вибірність. Вимоги до тракту радіочастоти. Автогенератори з параметричною стабілізацією частоти.....	9
Практичне заняття № 3. Загальні питання радіоприймальних пристроїв	12
Практичне заняття № 4. Вхідне коло радіоприймальних пристроїв	17
Практичне заняття № 5. Односигнальна вибірковість приймача. Методи прямого синтезу частот. Системи непрямого синтезу частот. Багатосигнальна вибірковість радіоприймача.....	22
Практичне заняття №6 «Моделювання синтезатора частот з використанням	32
кола імпульсної ФАПЧ за допомогою програмного пакету ADIsimPLL 4.30»	32
Практичне заняття №7. Передпроектна оцінка передачі інформації по лінії далекого космічного зв'язку. Техніко-економічна оптимізація тракту НВЧ приймальної та передавальної земної станції супутникової лінії зв'язку.....	84
Перелік посилань	115

Вступ

Одним з напрямку розвитку інформаційно-комунікаційних систем на сьогодні є розвиток сучасних технологій передавальних та приймальних пристроїв.

Сучасні технології передавальних та приймальних пристроїв постійно вдосконалюються та поширюються у всьому світі та є складовим елементом інформаційної безпеки держави.

Кредитний модуль дисципліни «Передавальні та приймальні пристрої», який викладається студентам, що навчаються за спеціальностями присвячений питанням аналізу та побудови сучасних технологій передавальних та приймальних пристроїв.

Таким чином, для студентів, що отримують спеціальність в галузі телекомунікацій, необхідним є розуміння основ сучасних технологій передавальних та приймальних пристроїв.

В даному посібнику викладено вказівки до виконання практичних занять в межах зазначеного кредитного модуля. Основною метою практичних занять є отримання студентами навичок з основ побудови сучасних технологій передавальних та приймальних пристроїв.

Загальні вказівки до виконання практичних занять

Підготовка до заняття

Під час підготовки до заняття необхідно опрацювати зазначений теоретичний матеріал, що було викладено в рамках лекційного курсу. Для більш детального розгляду теоретичного матеріалу необхідно скористатись додатковою літературою, посилання на окремі джерела містяться в матеріалах лекцій. Список літератури для підготовки, де розглянуто усі теоретичні та практичні питання в межах практичних занять, наведено в кінці даного посібника у відповідному розділі.

Хід виконання роботи та вимоги до оформлення результатів

На кожному практичному занятті розглядаються декілька практичних питань. На початку заняття студент демонструє виконання визначених практичних завдань у письмовому вигляді або у вигляді текстового файла, який містить результати роботи. Оцінка роботи студента на занятті враховує:

- наявність оформлених результатів розрахунків;
- розуміння основних теоретичних положень в рамках тематики заняття;
- розуміння змісту практичних питань, розглянутих на занятті.

Практичне заняття № 1. Основні відомості про радіопередавальні пристрої

1. Мета роботи

1. Вивчити та засвоїти основні терміни пов'язані зі тематикою радіопередавальних пристроїв.
2. Вивчити класифікацію, принципи побудови сучасних радіопередавальних пристроїв.
3. Зрозуміти загальні характеристики, структуру та принципи побудови радіопередавальних пристроїв.

2. Теоретичні знання

Студент має володіти теоретичним матеріалом, викладеним у лекції № 1,2.

3. Організація роботи на занятті

Під час аудиторного заняття послідовно виконується одне або декілька завдань. Усі присутні одночасно беруть участь у обговоренні питань. Один зі студентів надає відповідь на визначене біля дошки, решта – на персональних комп'ютерах або в зошиті для практичних занять.

4. Фіксація результатів виконання завдань

Підготовка до практичного заняття включає роботу студента з основною та додаткову літературою. Результатом роботи кожного студента є окремий документ Microsoft Word, в якому висвітлюються основні відповіді на кожне питання. Даний файл має містити такі пункти:

- 1) вступ;
- 2) сутність питання;
- 3) висновки. Якщо студент виконує завдання вручну в зошиті, наприкінці заняття він показує викладачеві відповідні результати розрахунків.

5. Оцінка роботи студентів на занятті

Наприкінці практичного заняття викладач оцінює кожного студента, присутнього на ньому. Демонстрація файлу результатів або зошита з виконанням усіх розглянутих завдань є підставою для отримання студентом максимального балу, передбаченого за роботу на занятті. При цьому неповне виконання завдань, відсутність зафіксованих результатів роботи або нездатність студента відповісти на теоретичні питання є підставою для зниження оцінки. Мінімальною оцінкою є 0 балів, що відповідає відсутності студента на занятті або відсутності жодних

результатів роботи на ньому.

6. Виступи студентів на теми:

1. Досліди Г. Герца. Структурна схема та принцип дії найпростішого радіопередавального пристрою А. С. Попова.
2. Основні етапи розвитку техніки та теорії радіопередавальних пристроїв.
3. Поясніть, у чому полягає призначення радіопередавача. Назвіть радіотехнічні системи, в яких застосовуються радіопередавачі.
4. Діапазони частот, що відведено для радіозв'язку.
5. Канальна ємність, характеристика особливостей поширення електромагнітних хвиль діапазонів *кіло-, гекто- та декаметрових хвиль* та основні види радіотехнічних систем, що працюють у вказаних діапазонах.
6. Діапазони частот, що відведено для радіозв'язку. Канальна ємність, характеристика особливостей поширення електромагнітних хвиль діапазонів *метрових, дециметрових та сантиметрових хвиль* та основні види радіотехнічних систем, що працюють у вказаних діапазонах.
7. Структурна схема та принцип дії симплексної системи радіозв'язку. Переваги та недоліки симплексної системи зв'язку.
8. Структурна схема та принцип дії дуплексної системи радіозв'язку. Переваги та недоліки дуплексної системи радіозв'язку.
9. Дуплексер радіостанції: призначення, принцип дії, структурна схема, електрична схема, основні параметри. Відмінність між дуплексером та диплексером.
10. Призначення, принцип дії та класифікація антенно-фідерних пристроїв радіопередавального пристрою.
11. Роль середовища та механізми поширення радіохвиль у системах радіозв'язку. Переваги та недоліки радіозв'язку.
12. Загальні технічні вимоги, що висуваються до систем радіозв'язку.
13. Класифікація радіопередавальних пристроїв.
14. Основні технічні характеристики радіопередавальних пристроїв та їх вплив на параметри системи радіозв'язку.
15. Характеристика видів радіовипромінювань на виході радіопередавального пристрою та способів боротьби з ними.
16. Узагальнена структурна схема радіопередавального пристрою та призначення її основних елементів. Каскади та тракти радіопередавача.
17. Обґрунтуйте необхідність виконання процесу модуляції у радіопередавальному пристрої.
18. Структурна схема та принцип дії радіопередавача з амплітудною модуляцією.

19. Структурна схема та принцип дії радіопередавача з частотною модуляцією.
20. Структурна схема та принцип дії радіопередавача з імпульсною модуляцією.
21. Збуджувач радіопередавача: призначення, структурні, параметри.
22. Розрахуйте коефіцієнт підсилення радіопередавача за потужністю в разях і децибелах при потужності сигналу, що передається в антену $P_A = 1$ кВт, коефіцієнті $K_{АФП} = 0,7$ і потужності збудника $P_{зб\text{уд}} = 1$ мВт.
23. Розрахуйте коефіцієнт підсилення радіопередавача за потужністю в разях і децибелах при коефіцієнті підсилення 1-го каскаду 8 дБ, 2-го каскаду 9 дБ, 3-го каскаду 6 дБ.
24. Поясніть, яким чином можна виміряти вихідну потужність радіопередавального пристрою за допомогою спрямованого відгалужувача.
25. Поясніть, яким чином можна виміряти коефіцієнт стоячої хвилі антенно-фідерного тракту радіопередавального пристрою за допомогою спрямованого відгалужувача.
26. Поясніть основні механізми розподілу потужності в радіопередавачі. Що таке промисловий ККД радіопередавача і яким чином його вимірити?
27. Класифікація видів потужності на виході радіопередавального пристрою відповідно до ГОСТ 24375-80.
28. Послідовність та зміст етапів при проектуванні радіопередавальних пристроїв.

Критерії оцінювання:

- 1) Повне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання: **2** бали;
- 2) Неповне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання: **1,5** бали;
- 3) Неповне розкриття змісту питання та неповна відповідь на додаткові питання: **1...0,5** балів;
- 4) Відсутність підготовки до практичного заняття: **0** балів.

Практичне заняття № 2. Структурні схеми радіоприймачів. Коефіцієнт шуму та чутливість радіоприймача. Односигнальна та багатосигнальна вибірність. Вимоги до тракту радіочастоти. Автогенератори з параметричною стабілізацією частоти.

1. Мета заняття

1. Засвоїти питання структурних схем радіоприймачів
2. Вивчити питання характеристик та вимог до сучасних радіоприймачів.
3. Усвідомити питання принципів побудови та характеристик автогенераторів з параметричною стабілізацією частоти

2. Теоретичні знання

Студент має володіти теоретичним матеріалом, викладеним у лекції № 2.

3. Організація роботи на занятті

Під час аудиторного заняття послідовно виконується одне або декілька завдань. Усі присутні одночасно беруть участь у обговоренні питань. Один зі студентів надає відповідь на визначене біля дошки, решта – на персональних комп'ютерах або в зошиті для практичних занять.

4. Фіксація результатів виконання завдань

Підготовка до практичного заняття включає роботу студента з основною та додатковою літературою. Результатом роботи кожного студента є окремий документ Microsoft Word, в якому висвітлюються основні відповіді на кожне питання. Даний файл має містити такі пункти:

- 1) вступ;
- 2) сутність питання;
- 3) висновки.

Якщо студент виконує завдання вручну в зошиті, наприкінці заняття він показує викладачеві відповідні результати роботи.

5. Оцінка роботи студентів на занятті

Наприкінці практичного заняття викладач оцінює кожного студента, присутнього на ньому. Демонстрація файлу результатів або зошита з виконанням усіх розглянутих завдань є підставою для отримання студентом максимального балу, передбаченого за роботу на занятті. При цьому неповне виконання завдань, відсутність зафіксованих результатів роботи або нездатність студента відповісти на теоретичні питання є підставою для зниження оцінки. Мінімальною оцінкою

є 0 балів, що відповідає відсутності студента на занятті або відсутності жодних результатів роботи на ньому.

6. Питання для розгляду:

1. Електрична схема та принцип дії радіоприймача О. С. Попова
2. Узагальнена структурна схема радіоприймального пристрою. Вимоги, що висуваються до сучасних радіоприймачів.
3. Основні типи структурних схем радіоприймачів. Порівняльна характеристика.
4. Електрична схема та принцип дії детекторного радіоприймача. Переваги та недоліки радіоприймача.
5. Структурна схема та принцип дії приймача прямого підсилення. Переваги та недоліки радіоприймача.
6. Структурна схема та принцип дії супергетеродинного радіоприймача. Переваги та недоліки радіоприймача.
7. Основні технічні характеристики та параметри радіоприймачів.
8. Небалансний та балансний змішувачі частот: електричні схеми, принцип дії, основні параметри, порівняльна характеристика.
9. Кільцевий та субгармонійний змішувачі частот: електричні схеми, принцип дії, основні параметри, порівняльна характеристика.
10. Структурна схема та принцип дії супергетеродинного радіоприймача з цифровим перетворенням частоти.
11. Дзеркальний канал прийому: способи визначення частоти та методи його придушення.
12. Синхродинамний та інфрадинамний радіоприймачі: структурні схеми, принцип дії, переваги та недоліки застосування.
13. Автогенератор. Загальна структурна схема автогенератору, принцип його дії. Вимоги, що висуваються до автогенераторів передавача. Умови виникнення коливань в автогенераторі.
14. Класифікація автогенераторів. Активні елементи автогенератору різних діапазонів частот та критерії його вибору.
15. Обґрунтування необхідності підвищення стабільності частоти автогенератору. Способи стабілізації частоти. Параметрична стабілізація частоти автогенераторів. Визначення, принцип її технічної реалізації.
16. Коливальний контур автогенератору та вплив його основних параметрів на частоту генерації. Резонансні явища в коливальному контурі.
17. Коливальна система автогенератору: класифікація та особливості застосування.
18. НВЧ автогенератори з параметричною стабілізацією частоти на базі діелектричного резонатору: структурні схеми, принцип дії, основні параметри.

19. НВЧ автогенератор з об'ємним хвилеводним резонатором: структурна схема, принцип дії, основні параметри.
20. Шумові властивості (фазовий шум) автогенераторів, методи їх опису, їх вплив на достовірність передачі інформації. Методи підвищення спектральної «чистоти» коливань, що генеруються.
21. Електричні схеми автогенераторів трансформаторного типу з параметричною стабілізацією на лампах та транзисторах: загальний принцип дії.
22. Трьохточкові автогенератори з параметричною стабілізацією частоти: умови виникнення коливань та різновиди схем.
23. Дестабілізуючі фактори, що впливають на частоту коливань автогенератора з параметричною стабілізацією частоти та способи їх зменшення: температура та вологість
24. Дестабілізуючі фактори, що впливають на частоту коливань автогенератора з параметричною стабілізацією частоти та способи їх зменшення: тиск та коливання напруг живлення.

Критерії оцінювання:

- 1) Повне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання: 2 бали;
- 2) Неповне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання: 1,5 бали;
- 3) Неповне розкриття змісту питання та неповна відповідь на додаткові питання: 1...0,5 балів;
- 4) Відсутність підготовки до практичного заняття: 0 балів.

Практичне заняття № 3. Загальні питання радіоприймальних пристроїв

1. Мета заняття

1. Вивчити призначення, місце радіоприймальних пристроїв в структурі телекомунікаційних систем.
2. Зрозуміти питання побудови сучасних приймача прямого підсилення та супергетеродійного приймача.
3. Придбати навички з розрахунку складових частин радіоприймача

2. Теоретичні знання

Студент має володіти теоретичним матеріалом, викладеним у лекції № 5.6.

3. Організація роботи на занятті

Під час аудиторного заняття послідовно виконується одне або декілька завдань. Усі присутні одночасно беруть участь у обговоренні питань. Один зі студентів надає відповідь на визначене біля дошки, решта – на персональних комп'ютерах або в зошиті для практичних занять.

4. Фіксація результатів виконання завдань

Підготовка до практичного заняття включає роботу студента з основною та додаткову літературою. Результатом роботи кожного студента є окремий документ Microsoft Word, в якому висвітлюються основні відповіді на кожне питання. Даний файл має містити такі пункти:

1. вступ;
2. сутність питання;
3. висновки.

Якщо студент виконує завдання вручну в зошиті, наприкінці заняття він показує викладачеві відповідні результати роботи.

5. Оцінка роботи студентів на занятті

Наприкінці практичного заняття викладач оцінює кожного студента, присутнього на ньому. Демонстрація файлу результатів або зошита з виконанням усіх розглянутих завдань є підставою для отримання студентом максимального балу, передбаченого за роботу на занятті. При цьому неповне виконання завдань, відсутність зафіксованих результатів роботи або нездатність студента відповісти на теоретичні питання є підставою для зниження оцінки. Мінімальною оцінкою є 0 балів, що відповідає відсутності студента на занятті або відсутності жодних результатів роботи на ньому.

6. Питання для розгляду:

1. Преселектор приймача переналаштовується змінним конденсатором ($C_{к.мин} = 6$ пФ, $C_{к.мак} = 318$ пФ). Індуктивність контуру, що переналаштовується, дорівнює $0,273$ мГн. Ємність монтажу, що підключається до змінного конденсатора, 20 пФ. Розрахуйте граничні частоти ($f_{0.мин}$ та $f_{0.мак}$) діапазону переналаштування приймача. На скільки процентів змінюються значення $f_{0.мин}$ та $f_{0.мак}$, якщо ємність монтажу зменшити до 10 пФ ?
2. Високочастотний блок приймача прямого підсилення складається з чотирьох ідентичних каскадів з одиночними контурами, що налаштовано в резонанс. Якою повинна бути еквівалентна добротність контурів, щоб на частоті $1,5$ МГц смуга пропускання приймача складала 6 кГц ?
3. Розбити діапазон робочих частот $3,95...12,1$ МГц таким чином, щоб коефіцієнт перекриття кожного піддіапазона був не більше за $1,8$.
4. Перевірити, чи зможе блок конденсаторів з ємністю від 12 до 250 пФ забезпечити перекриття діапазону середніх хвиль транзисторного радіоприймача.
5. За допомогою часових діаграм показати перетворення повідомлення на вході та виході основних елементів структурної схеми системи телефонного радіозв'язку у припущенні, що звуковий тиск на мембрану мікрофона змінюється за синусоїдальним законом.
6. Зобразити структурні схеми приймачів прямого підсилення та супергетеродинного. Порівняти їх схожість та відмінність. Пояснити, яким чином розподіляються основні функції між їх елементами.
7. Чи можливе приймання повідомлення за відсутності у складі радіоприймача:
а) детектора; б) підсилювача; в) резонансних контурів, що переналаштовуються; г) резонансних контурів, що не переналаштовуються; д) пристрою відтворення? Які функції радіоприймача порушуються, якщо відсутнім є один з перелічених елементів ?
8. За допомогою часової та спектральної діаграм пояснити функцію частотної вибірконості та процес детектування в радіоприймачі.
9. Зобразити часову та спектральну діаграми сигналів на вході та виході підсилювального пристрою для випадків амплітудної та частотної модуляцій.
10. За допомогою відповідних малюнків пояснити сутність частотної, амплітудної, часової та просторової вибірконостей приймача.
11. За допомогою спектральної діаграми пояснити процес виділення корисного сигналу, якщо на вході приймача присутній широкий спектр електромагнітних коливань. Прийняти, що спектри бажаного та небажаного радіосигналів не перекриваються. Якою повинна бути АЧХ фільтра, щоб на його виході завадовий

сигнал був повністю відсутній ? Який частотний фільтр найкращим чином може задовільнити таку вимогу ?

12. Зобразити резонансні характеристики радіоприймача на краях робочого діапазону частот таким чином, щоб була видна зміна частот вибірконості, приймаючи, що добротність (Q) та смуга пропускання (Δf) є постійними.

13. Намалювати для кожного тракту та всього супергетеродинного приймача в цілому його амплітудно-частотні характеристики. Показати на них смугу пропускання. Визначити результуюче ослаблення крайніх складових спектра відтворювального сигналу, якщо в кожному тракті воно дорівнює 3 дБ.

14. Намалювати часову та спектральну діаграми АМ сигналу на вході та виході УВЧ приймача прямого підсилення, що налаштований на 200 кГц. Модулюючий сигнал 5 кГц. Відмітити схожість та відмінність в діаграмах вхідного та вихідного сигналів.

15. Намалювати спектральну діаграму АМ радіосигналу на вході та виході підсилювача приймача прямого підсилення, що налаштований на 500 кГц. Спектр модулюючого сигналу 80...5000 Гц. Вказати значення крайніх частот бічних смуг та ширину смуги частот радіосигналу.

16. Намалювати в масштабі спектральні діаграми напруги АМ сигналу на вході та виході детектору. Несна частота 550 кГц, спектр модуляції 100...10000 Гц. Вказати значення крайніх частот смуги.

17. Що таке динамічний діапазон радіосигналу та радіоприймача ? Порівняти ці два поняття та відмітити схожість та відмінність. Як пов'язані ці два якісні показники між собою та від чого залежить кожен з них ?

18. Намалювати характеристику, що показує залежність частотної вибірконості радіоприймача від абсолютної розстройки. Пояснити хід характеристики. Як зміниться форма характеристики, якщо зменшити загасання одного з резонансних кіл ? Як зміниться форма характеристики, якщо резонансні кола переналаштувати на більш високу частоту ?

19. У таблиці показано значення чутливості десяти стаціонарних радіомовних приймачів. Необхідно скласти ряд номерів приймачів у порядку покращення їх чутливості. Яку функцію приймача характеризує чутливість як якісний показник?

Номери приймачів	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Чутливість, мкВ	50	5	150	15	2,5	100	300	25	250	200

20. Два приймачі мають реальну чутливість 10 мкВ. Але, у першого вказана чутливість відповідає відношенню сигнал/шум на виході 3 дБ, а у другого 10 дБ. Який з приймачів має кращу чутливість. Відповідь аргументувати.

21. У таблиці наведено значення чутливості по напруженістю поля для 12-ти переносних радіомовних приймачів. На скільки груп їх можна розділити, якщо в кожену групу включити приймачі з однаковим діапазоном (порядком) чутливості ?

Номери приймачів	1	2	3	4	5	6
Чутливість, мкВ/м	100	10	150	3	0,15	2,5
Номери приймачів	7	8	9	10	11	12
Чутливість, мкВ/м	50	0,01	300	0,1	500	0,5

22. Розподілити за трактами супергетеродинного приймача односигнальну вибірковість, що вказана в таблиці. Обґрунтувати обраний розподіл вибіркової. Вказати, у скільки разів послаблюється кожна завада. Результати розподілу записати у другу таблицю.

Вид вибіркової за каналами прийому	Варіанти значень вибіркової, дБ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сусідньому	55	50	40	45	30	26	22	18	40
Дзеркальному	60	54	50	46	40	34	32	26	16
Прямого проходження	90	40	50	34	40	30	26	35	35

Вид вибіркової за каналами прийому	Задано	Тракт радіочастот		
		радіо	проміжної	звукової
Сусідньому				
Дзеркальному				
Прямого проходження				

23. Частотна вибірковість приймача дорівнює 60 дБ. У скільки разів послаблюється завада ? Відповідь пояснити за допомогою амплітудно-частотної характеристики. Визначити підсилення сигналу на частоті налаштування

радіоприймача, якщо завада при розстройці послаблюється на 20 дБ. Коефіцієнт передавання на частоті завади 10. Відповідь пояснити малюнками, на яких вказати значення заданих та отриманих величин.

24. Визначити амплітуду сигналу проміжної частоти на вході детектора, якщо коефіцієнт передавання вхідного кола $K_{В.К} = 4$, тракту перетворення частоти $K_{П.Ч} = 40$, тракту проміжної частоти $K_{УП} = 80$, якщо чутливість радіоприймача 200 мкВ.

25. Визначити коефіцієнт підсилення лінійної частини приймача, що забезпечує амплітуду сигналу на вході детектора 0,5 В при напруженості поля 10 мВ/м та діючій висоті антени, що дорівнює 2 см.

Критерії оцінювання:

- 1) Повне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання: **2** бали;
- 2) Неповне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання: **1,5** бали;
- 3) Неповне розкриття змісту питання та неповна відповідь на додаткові питання: **1...0,5** балів;
- 4) Відсутність підготовки до практичного заняття: **0** балів.

Практичне заняття № 4. Вхідне коло радіоприймальних пристроїв

1. Мета заняття

1. Вивчити призначення, місце, характеристики вхідних кіл в радіоприймальних пристроях.
2. Зрозуміти принципи побудови вхідних кіл.
3. Придбати навички щодо розрахунку параметрів елементів вхідних кіл радіоприймальних пристроїв.

2. Теоретичні знання

Студент має володіти теоретичним матеріалом, викладеним у лекції № 6.

3. Організація роботи на занятті

Під час аудиторного заняття послідовно виконується одне або декілька завдань. Усі присутні одночасно беруть участь у обговоренні питань. Один зі студентів надає відповідь на визначене біля дошки, решта – на персональних комп'ютерах або в зошиті для практичних занять.

4. Фіксація результатів виконання завдань

Підготовка до практичного заняття включає роботу студента з основною та додатковою літературою. Результатом роботи кожного студента є окремий документ Microsoft Word, в якому висвітлюються основні відповіді на кожне питання. Даний файл має містити такі пункти:

- 1) вступ;
- 2) сутність питання;
- 3) висновки.

Якщо студент виконує завдання вручну в зошиті, наприкінці заняття він показує викладачеві відповідні результати розрахунків.

5. Оцінка роботи студентів на занятті

Наприкінці практичного заняття викладач оцінює кожного студента, присутнього на ньому. Демонстрація файлу результатів або зошита з виконанням усіх розглянутих завдань є підставою для отримання студентом максимального балу, передбаченого за роботу на занятті. При цьому неповне виконання завдань, відсутність зафіксованих результатів роботи або нездатність студента відповісти на теоретичні питання є підставою для зниження оцінки. Мінімальною оцінкою є 0 балів, що відповідає відсутності студента на занятті або відсутності жодних результатів роботи на ньому.

6. Питання для розгляду:

Примітка: Для вирішення задач, що представлено в даному практичному занятті, рекомендується скористатися літературою [1, стр.6-15]

Задача №1

Передавач радіорелейної лінії зв'язку з часовим поділом каналів формує радіоімпульси тривалістю 1 мкс, з періодом повторення 5 мкс. Несуча частота - 10 ГГц, модуляція вихідної імпульсної послідовності з частотою 0,3 - 3,4 кГц. Знайти смугу пропускання високочастотного тракту радіоприймача, що необхідна для приймання цього сигналу, зобразити часову форму сигналу та його спектр.

Задача №2

Знайдіть діючу висоту штирьової та рамкової антен радіоприймального пристрою при довжині хвилі $\lambda = 2,5$ м; 10 и 100 м. Геометрична висота штирьової антени $h = 1$ м; рамкова антена має один виток діаметром 1 м.

Задача №3

Знайдіть вихідний опір $Z_{\text{вих}}(j\omega)$ штирьової антени (рис.1) висотою $h = 5$ м та побудуйте графік залежності модуля вихідного опору від частоти в діапазонах ДХ, СХ, КХ.

Примітка: У якості такої антени для радіомовних приймачів прийнята антена висотою $h = 5$ м з наступними значеннями параметрів еквівалентної схеми: $R_{A1} = 80$ Ом; $R_{A2} = 320$ Ом; $C_{A1} = 125$ пФ; $C_{A2} = 400$ Ом; $L_A = 20$ мкГн.

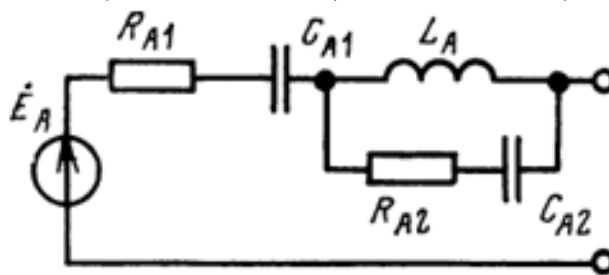


Рис.1

Задача №4

У діапазоні ДХ радіомовного приймача проміжна частота $f_{\text{пр}}$ вище частоти сигналу, що приймається. Якщо в якості $f_{\text{пр}}$ використовувати не різницеву, а сумарну частоту перших гармонік напруг гетеродину та сигналу, то які будуть негативні наслідки такого рішення ?

Задача №5

В діапазоні КХ радіомовного приймача вхідне коло містить один коливальний

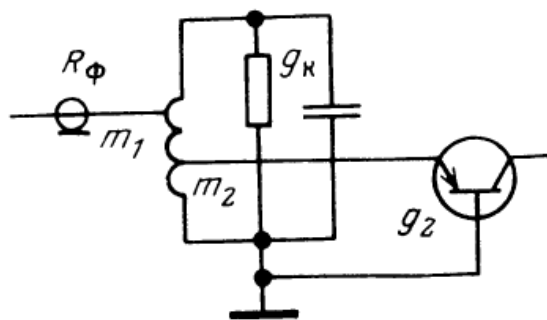
контур, а підсилювач частоти відсутній. Приймач налаштовано на частоту 12 МГц, еквівалентна добротність контуру 100. Визначте, у скільки разів зросте вибірковість приймача за сусіднім та дзеркальним каналом, якщо ввести каскад одноконтурного УРЧ з тією ж самою добротністю контуру.

Задача №6

Визначте коефіцієнти включення m_1 та m_2 , що забезпечують узгодження налаштованої приймальної антени з одноконтурним входним колом на рис.1 ($f_0 = 150$ МГц, $R_A = 100$ Ом, $g_2 = 5$ мСм; $C_{к.эк} = 20$ пФ, $d_k = 0,05$), якщо необхідна смуга пропускання 37,5 МГц.

Задача №7

Вхідне коло узгоджене з антеною при заданій смузі пропускання. Визначте коефіцієнт пропускання входного кола при наступних вихідних даних: $m_2 = 0,1$, $R_\Phi = 100$ Ом, $g_k = 1$ мСм, $g_2 = 80$ мСм, $f_0 = 132$ МГц, $C_{к.эк} = 30$ пФ.



Задача №8

Одноконтурне вхідне коло має наступні параметри: $f_0 = 100$ МГц, $C_{к.эк} = 20$ пФ, $g_k = 0,13$ мСм, $m_1 = 0,3$, $m_2 = 0,69$. Опір антени 150 Ом, провідність навантаження 1 мСм. Необхідно збільшити вибірковість входного кола на частоті завади на 10 дБ. Визначте нові значення коефіцієнтів включення. Чому при цьому дорівнює програт в значенні коефіцієнта передавання ?

Задача №9

У скільки разів зменшиться коефіцієнт передавання узгодженого одноконтурного входного кола радіоприймача, якщо від режиму максимального коефіцієнта передавання перейти до режиму заданого розширення смуги пропускання ($g_1 = 20$ мСм, $g_k = 1,5$ мСм, $g_2 = 8$ мСм, $\gamma = 2,5$) ?

Задача №10

Одноконтурне вхідне коло має автотрансформаторний зв'язок з антеною і входом першого каскаду ($g_k = 1$ мСм, $g_2 = 5$ мСм). Антена узгоджена з входним колом, а коефіцієнти включення m_1 та m_2 обираються з умови забезпечення

режиму максимального коефіцієнта передавання без обмеження смуги пропускання. Визначте коефіцієнти m_1 та m_2 , а також коефіцієнти передавання вхідного кола при $R_A = 75 \text{ Ом}$.

Задача №11

За наведеними на рис.1 графіком та параметрами вхідного кола встановіть, яка з індуктивностей є більшою L_K або L_{CB} .

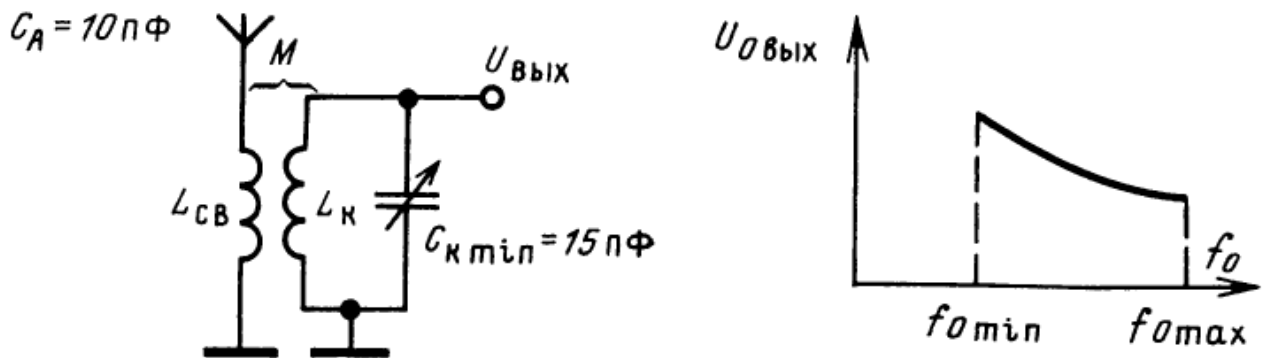


Рис.1

Задача №12

До вхідного кола, що показано на рис.1 можуть бути підключені неналаштовані штирьові антени з різними ємностями $C_A = 30 \dots 50 \text{ пФ}$. При переналаштуванні в діапазоні частот $525 \dots 1530 \text{ кГц}$ допустима зміна коефіцієнта передавання вхідного кола не більше 10 дБ .

Визначте індуктивність котушки індуктивності L_{CB} .

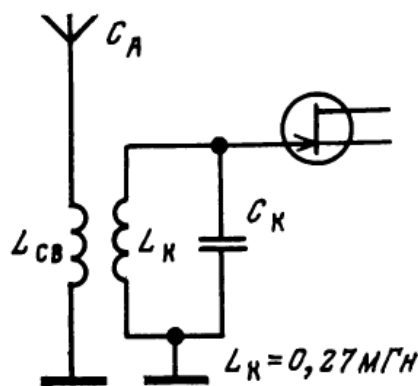


Рис.1

Задача №13

Розрахуйте П-подібну схему узгоджувального кола (рис.1), що призначене для узгодження опору генератора $Z_G = 4 + j20 \text{ Ом}$ з навантаженням $Z_H = 50 - j5 \text{ Ом}$ на частоті $f_0 = 100 \text{ МГц}$ (Y_3 – котушка індуктивності). Знайдіть сквозний резонансний коефіцієнт передавання напруги цього кола.

Задача №14

Розрахуйте параметри узгоджувального кола, що зображене на рис.1 при $R_{\Gamma} = 10 \text{ Ом}$, $C_H = 20 \text{ пФ}$, $R_H = 50 \text{ Ом}$, $K_{\text{ст.У}} = 1,2$, $f_H = 250 \text{ МГц}$, $f_B = 350 \text{ МГц}$.

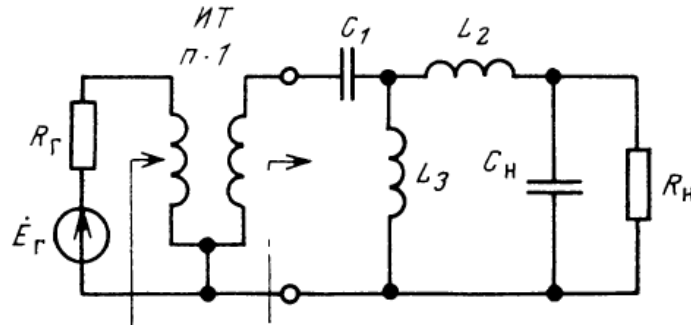


Рис.1

Задача №15

Розрахуйте параметри узгоджувального кола, що зображене на рис.1 при $R_{\Gamma} = 150 \text{ Ом}$, $L_H = 0,1 \text{ мкГн}$, $R_H = 50 \text{ Ом}$, $K_{\text{ст.У}} = 1,2$, $f_H = 100 \text{ МГц}$, $f_B = 150 \text{ МГц}$.

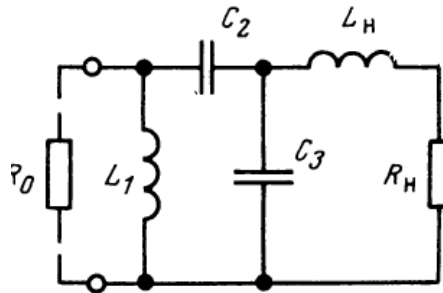


Рис.1

Критерії оцінювання:

- 1) Повне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання: **2** бали;
- 2) Неповне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання: **1,5** бали;
- 3) Неповне розкриття змісту питання та неповна відповідь на додаткові питання: **1...0,5** балів;
- 4) Відсутність підготовки до практичного заняття: **0** балів.

Практичне заняття № 5. Односигнальна вибірковість приймача. Методи прямого синтезу частот. Системи непрямого синтезу частот. Багатосигнальна вибірковість радіоприймача

1. Мета заняття

1. Зрозуміти принципи побудови різноманітних преселекторів
2. Вивчити питання односигнальної вибірковість приймача
3. Усвідомити методи прямого синтезу частот

2. Теоретичні знання

Студент має володіти теоретичним матеріалом, викладеним у лекції № 3.

3. Організація роботи на занятті

Під час аудиторного заняття послідовно виконується одне або декілька завдань. Усі присутні одночасно беруть участь у обговоренні питань. Один зі студентів надає відповідь на визначене біля дошки, решта – на персональних комп'ютерах або в зошиті для практичних занять.

4. Фіксація результатів виконання завдань

Підготовка до практичного заняття включає роботу студента з основною та додаткову літературою. Результатом роботи кожного студента є окремий документ Microsoft Word, в якому висвітлюються основні відповіді на кожне питання. Даний файл має містити такі пункти:

- 1) вступ;
- 2) сутність питання;
- 3) висновки.

Якщо студент виконує завдання вручну в зошиті, наприкінці заняття він показує викладачеві відповідні результати розрахунків.

5. Оцінка роботи студентів на занятті

Наприкінці практичного заняття викладач оцінює кожного студента, присутнього на ньому. Демонстрація файлу результатів або зошита з виконанням усіх розглянутих завдань є підставою для отримання студентом максимального балу, передбаченого за роботу на занятті. При цьому неповне виконання завдань, відсутність зафіксованих результатів роботи або нездатність студента відповісти на теоретичні питання є підставою для зниження оцінки. Мінімальною оцінкою є 0 балів, що відповідає відсутності студента на занятті або відсутності жодних результатів роботи на ньому.

6. Питання для розгляду:

Питання №1

1. Задача

Накреслити принципову схему преселектора, яка складається з:

Вхідного ланцюга:

- Зв'язок з антеною ємнісний;
- Вибіркова система;
- Зв'язок з ПРЧ індуктивний.

2. Вимоги до систем синтезу частот. Реалізація вимог в системах прямого синтезу частот.

Питання №2

1. Задача

Накреслити принципову схему преселектора, яка складається з:

Вхідного ланцюга:

- Зв'язок з антеною індуктивний;
- Вибіркова система;
- Зв'язок з ПРЧ автотрансформаторний.

2. Класифікація методів синтезу частот.

Питання №3

1. Задача

Накреслити принципову схему преселектора, яка складається з:

Вхідного ланцюга:

- Зв'язок з антеною безпосередня;
- Вибіркова система LC;

Зв'язок з ПРЧ автотрансформаторний.

2. Метод прямого синтезу частот «кварц-хвиля»

Питання №4

1. Задача

Накреслити принципову схему преселектора, яка складається з:

Вхідного ланцюга:

- Зв'язок з антеною комбінована;
- Вибіркова система LC;

Зв'язок з ПРЧ безпосередній.

2. Класифікація способів придушення побічних частот в схемах синтезаторів.

Питання №5

1. Задача

Накреслити принципову схему преселектора, яка складається з:
Вхідного ланцюга:

- Вибіркова система ферітова антена;
- Зв'язок з ПРЧ ємнісний.

2. Суть методу зворотного гетеродинування.

Питання №6

1. Задача

Накреслити принципову схему преселектора, яка складається з:
Вхідного ланцюга:

- Зв'язок з антеною ємнісний;
- Вибіркова система с одним варикапом;

Зв'язок з ПРЧ безпосередній.

2. Суть методу однокварцевого інтерполяційного синтезу частот

Питання №7

1. Задача

Вхідного ланцюга:

- Зв'язок з антеною індуктивний;
- Вибіркова система;
- Зв'язок з ПРЧ безпосередній.

2. Суть методу багатокварцевого інтерполяційного синтезу частот

Питання №8

1. Задача

Вхідного ланцюга:

- Зв'язок з антеною безпосередній;
- Вибіркова система LC;
- Зв'язок з ПРЧ індуктивний.

2. Синтезатори частоти з ідентичними декадними перетворювачами.

Питання №9

1. Задача

Вхідного ланцюга:

- Зв'язок з антеною комбінований;
- Вибіркова система з одним варикапом;
- Зв'язок з ПРЧ індуктивний.

2. Синтезатор частот типу генератор гармонік.

Питання №10

1. Задача

Накреслити принципову схему преселектора, яка складається з:

Вхідного ланцюга:

- Вибіркова система ферітова антена;
- Зв'язок з ПРЧ індуктивний.

2. Синтезатор частот з формуванням імпульсних послідовностей та програмним синтезом вихідних частот.

Питання №11

Задача

Розрахуйте частоту дзеркального каналу 1-го та 2-го перетворення частоти в супергетеродинному приймачі з двома перетвореннями частоти, якщо: частота сигналу, що приймається $f_0 = 140$ МГц, частота гетеродину ТПЧ-1 $f_{Г1} = 130$ МГц, частота гетеродину ТПЧ-2 $f_{Г2} = 14$ МГц. В обох випадках виконується перетворення частоти «вниз»

Питання №12

Задача

Розрахуйте частоту дзеркального каналу 1-го та 2-го перетворення частоти в супергетеродинному приймачі з двома перетвореннями частоти, якщо: частота сигналу, що приймається $f_0 = 67$ МГц, частота гетеродину ТПЧ-1 $f_{Г1} = 89$ МГц, частота гетеродину ТПЧ-2 $f_{Г2} = 21$ МГц. В обох випадках виконується перетворення частоти «вниз»

Питання №13

Задача

Розрахуйте частоту дзеркального каналу 1-го та 2-го перетворення частоти в супергетеродинному приймачі з двома перетвореннями частоти, якщо: частота сигналу, що приймається $f_0 = 230$ МГц, частота гетеродину ТПЧ-1 $f_{Г1} = 90$ МГц, частота гетеродину ТПЧ-2 $f_{Г2} = 120$ МГц. В обох випадках виконується перетворення частоти «вниз»

Питання №14

Використовуючи схему інтерполяційного некогерентного синтезу розробіть схему синтезатору частот на діапазон 51,000.....59,999 МГц.

Питання №15

Використовуючи схему інтерполяційного когерентного синтезу, розробіть схему синтезатору частоти на діапазон 20,000....49,999 МГц.

Питання №16

Використовуючи схему генератору гармонік, розробіть схему синтезатору частоти на діапазон 100....1000 МГц з кроком сітки частот $\Delta f_c = 20$ МГц.

Питання №17

Використовуючи декадну інтерполяційну схему синтезу частот, розробіть схему синтезатору частот на діапазон 10,000....29,999 МГц

Питання №18

Розрахуйте за допомогою номограми номінали та порядок комбінаційних частот, що утворюються на виході змішувача частот «вниз» супергетеродинного приймача та потрапляють в його тракт проміжної частоти, якщо проміжна частота $f_{пч} = 40$ МГц, діапазон вхідних частот корисного сигналу $f_{c.min}....f_{c.max} = 100...133,33$ МГц, налаштування гетеродину – нижнє ($f_r < f_c$).

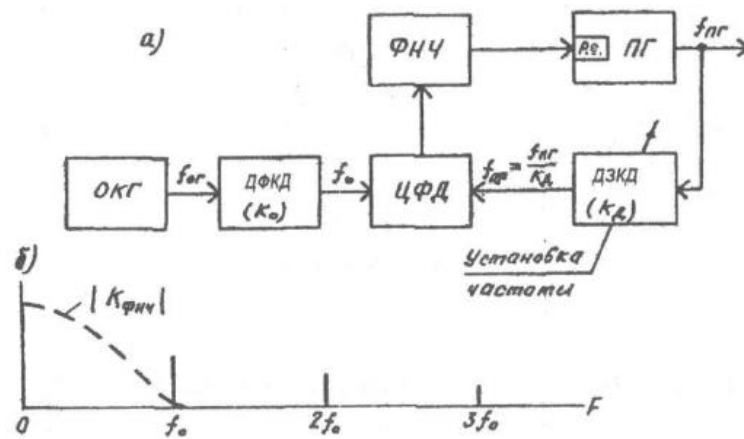
Питання №19

Розрахуйте за допомогою номограми номінали та порядок комбінаційних частот, що утворюються на виході змішувача частот «вниз» супергетеродинного приймача та потрапляють в його тракт проміжної частоти, якщо проміжна частота $f_{пч} = 10$ МГц, діапазон вхідних частот корисного сигналу $f_{c.min}....f_{c.max} = 12,5...14,3$ МГц, налаштування гетеродину – нижнє ($f_r < f_c$).

Питання №20

Розрахуйте за допомогою номограми номінали та порядок комбінаційних частот, що утворюються на виході змішувача частот «вниз» супергетеродинного приймача та потрапляють в його тракт проміжної частоти, якщо проміжна частота $f_{пч} = 15$ МГц, діапазон вхідних частот корисного сигналу $f_{c.min}....f_{c.max} = 75...150$ МГц, налаштування гетеродину – нижнє ($f_r < f_c$).

нестабільність частоти, послаблення побічних коливань в наведеній схемі синтезу ?



Питання №23. Дайте характеристику фізичних процесів в кільці ФАПЧ в режимі синхронізації. Яким чином реалізуються основні вимоги до вихідних коливань (діапазон частот), крок сітки частот, кількість фіксованих частот, довгострокова нестабільність частоти, послаблення побічних коливань в наведеній схемі синтезу ?

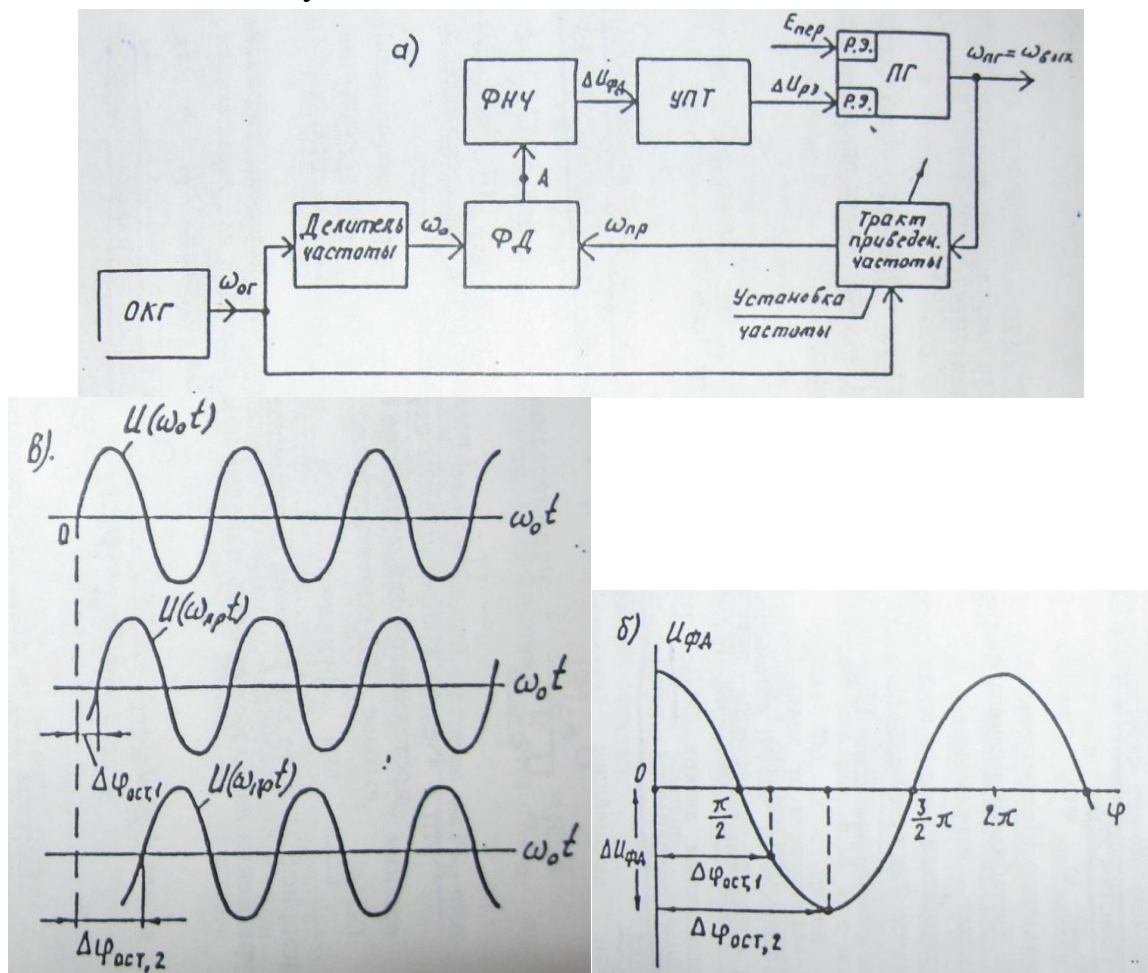
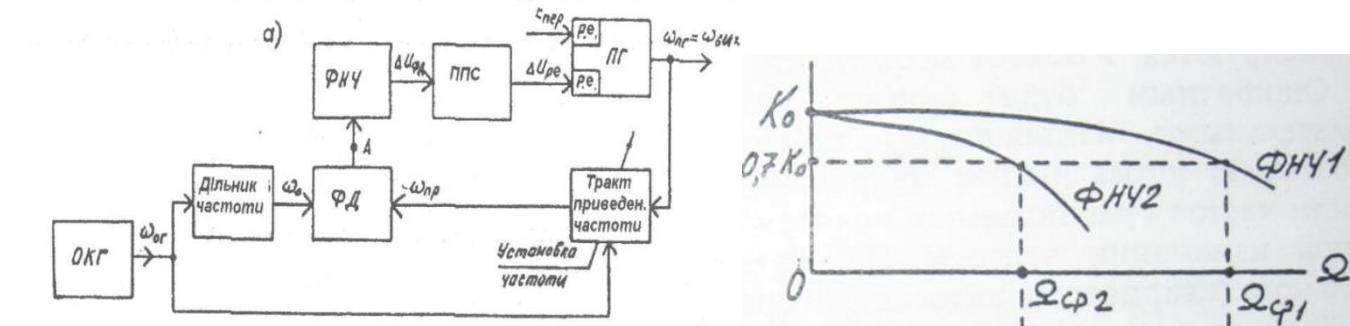
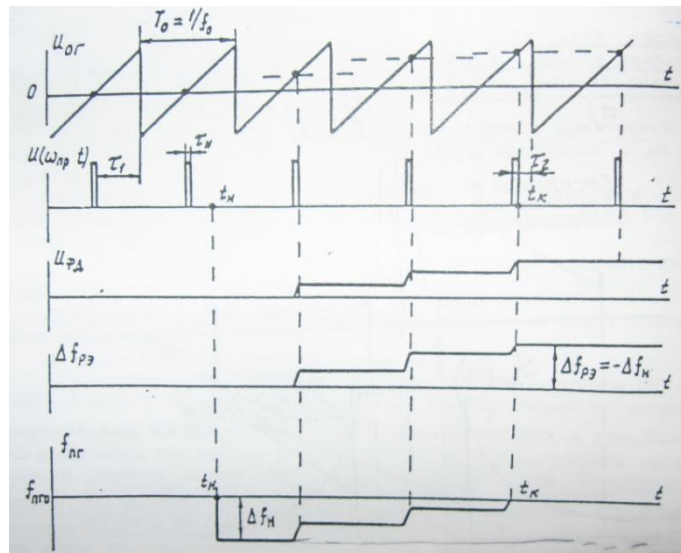


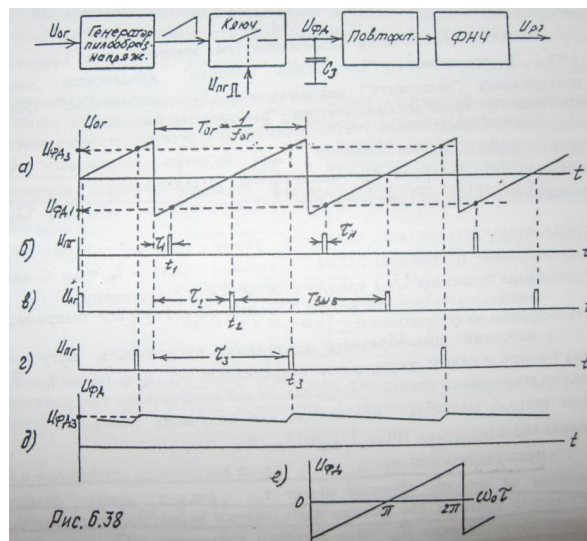
Figure 1.10 consists of two parts, (a) and (b). Part (a) shows three plots of the phase shift $U\varphi$ versus the frequency $\Omega_y t$ for different values of the parameter $\frac{\Omega_H}{\Omega_y}$. The first plot is for $\frac{\Omega_H}{\Omega_y} = 1.5$, the second for $\frac{\Omega_H}{\Omega_y} = -1.5$, and the third for $\frac{\Omega_H}{\Omega_y} = 1.15$. The plots show periodic oscillations of the phase shift. Part (b) shows the dependence of the phase shift on the frequency of the signal for the same parameter values. The plots show the capture and holding bands, with the capture band labeled "полоса захвата" and the holding band labeled "полоса удержания".



Питання №27. Поясніть принцип функціонування системи імпульсної ФАПЧ

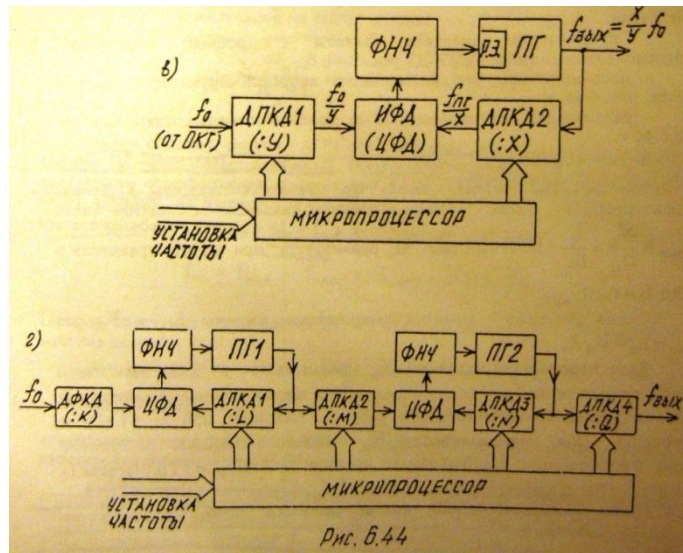


Питання №28 Поясніть принцип функціонування імпульсно-фазового дискримінатора типу «вибірка-запам'ятовування».



Питання №29 Побудуйте структурну схему синтезатору частот з ланцюгом цифрової ФАПЧ на діапазон вихідних частот $f_{\text{вих}} = 1,0 \dots 2,0$ ГГц з кроком сітки частот $\Delta f = 1$ кГц.

Питання №30 Поясніть принцип функціонування схеми апроксимуючого синтезу частот. Яким чином реалізуються основні вимоги до вихідних коливань (діапазон частот), крок сітки частот, кількість фіксованих частот, довгострокова нестабільність частоти, послаблення побічних коливань в наведеній схемі синтезу ?



Питання №31 Багатосигнальна вибірковість: визначення та класифікація. Явище блокування в радіоприймачі: причини виникнення, способи усунення.

Прохідна характеристика активного елемента підсилювача радіочастоти преселектора приймача описується поліномом

$$I_{\text{вих}} = 0,2 + 0,8U_{\text{вх}} + 0,3U_{\text{вх}}^2 + 1,8U_{\text{вх}}^3$$

Розрахуйте допустиму амплітуду напруги завади на вході цього підсилювача радіочастоти, якщо допустимий коефіцієнт блокування радіоприймача складає $K_{\text{бл.доп}} < 0,1$.

Питання №32 Багатосигнальна вибірковість: перехресна модуляція та взаємна модуляція. Прохідна характеристика активного елемента підсилювача радіочастоти преселектора приймача описується поліномом

$$I_{\text{вих}} = 0,5 + 0,6U_{\text{вх}} + 0,9U_{\text{вх}}^2 - 1,5U_{\text{вх}}^3$$

а амплітудно-модульована завада на його вході може бути представлена як

$$U_{\text{п}}(t) = 0,01(1 + 0,85\cos(2\pi \cdot 10^3 t))\cos(2\pi \cdot 10^7 t).$$

Розрахуйте коефіцієнт спотворення для ефекту перехресної модуляції, якщо корисний сигнал є АМ сигналом вигляду

$$U_{\text{п}}(t) = 0,0005(1 + 0,75\cos(4\pi \cdot 10^3 t))\cos(2\pi \cdot 10^7 t).$$

Критерії оцінювання:

1) Повне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання:

2 бали;

2) Неповне розкриття змісту питання та повна відповідь на додаткові питання:

1,5 бали;

3) Неповне розкриття змісту питання та неповна відповідь на додаткові питання:

1...0,5 балів;

4) Відсутність підготовки до практичного заняття: **0** балів.

Практичне заняття №6 «Моделювання синтезатора частот з використанням кола імпульсної ФАПЧ за допомогою програмного пакету ADIsimPLL 4.30»

Завдання

- 1) Розробити згідно прикладу синтезатор частоти з цілочисельним коефіцієнтом ділення, що працює в діапазоні f_{\min} - f_{\max} з кроком сітки Δf_c :
 - Вибрати відповідну мікросхему подільника з бібліотеки елементів з відповідним обґрунтуванням цього вибору.
 - Частоту опорного генератора прийняти рівною f_0 .
 - Потужність фазового шуму опорного генератора задати, використовуючи модель (Corner/Floor).
 - Перестроюваний генератор вибрати з бібліотеки елементів.
 - Рівень побічних спектральних складових синтезатора не повинен перевищувати -60 dBc.
 - Використовуваний порядок фільтра НЧ - довільний.
 - Рівень спектральної щільності фазового шуму синтезованого сигналу визначати в діапазоні 10 Гц - 100 МГц.

При необхідності підкоригувати параметри петлі ФАПЧ для досягнення режиму синхронізму. Критерієм правильності настройки синтезатора частоти, тобто досягнення режиму, близького до синхронізму, є зменшення параметра Abs Frequency Error (FreqError) зі збільшенням часу (Abs Frequency Error $\rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$). Для досягнення режиму роботи синтезатора частоти, близької до синхронізму, рекомендується з бібліотеки програми вибирати мікросхему синтезатора, яка має максимальне значення напруги регулювання (параметр V_p), дорівнює чи перевищує максимальну напругу регулювання перебудовується генератора (VCO) (параметр V_{\max}).

- 2) Порівняти спектр сигналу на виході синтезатора при токах витоку (параметр Leakage) 20 нА, 15 нА, 10 нА, 5 нА і 0 нА. При необхідності відкоригувати параметри петлевого фільтру НЧ для досягнення необхідного рівня побічних спектральних складових.

Оформити звіт, в якому привести вихідні дані всіх елементів, електричну схему синтезатора частот і графічні залежності його основних параметрів. Виходячи з аналізу отриманих кривих в звіті вказати, чи вдалося отримати режим синхронізму чи ні.

Вступ

ADISimPLL - інтерактивна програма фірми Analog Devices для розрахунку синтезаторного кільця ІФАПЧ, спроектованого з використанням мікросхем серії ADF4000.

Програма дозволяє істотно спростити і прискорити процедуру проектування і аналіз характеристик синтезатора в перехідному і усталеному режимах.

Теоретичні основи проектування ІФАПЧ синтезаторів базуються на ряді положень теорії автоматичного регулювання. Серед них частотні методи аналізу, що встановлюють зв'язок між параметрами частотних характеристик разомкнутого кільця і характеристиками кільця ІФАПЧ. До числа таких параметрів відносяться частота одиничного посилення разомкнутого кільця, запас стійкості по фазі, з якими безпосередньо пов'язані тривалість перехідного процесу і величина коливальності перехідної характеристики. Застосування балки-ріфміческіх частотних характеристик дозволяє встановити механізм перетворення спектральної щільності потужності різних перешкод всередині кільця в спектральну щільність фазових флуктуацій синтезованого сигналу і виконати її необхідний розрахунок.

Проектування синтезатора на основі ІФАПЧ полягає в **виконанні наступних кроків**:

- визначення частотних вимог до синтезуються сигналів і вихідним вузлів синтезатора;

- вибір цифрової мікросхеми серії ADF (*chip*);

- вибір перебудовується генератора (ПГ, ГУН) (VCO);

- вибір опорного кварцового генератора (*Reference*);

- вибір типу петлевого фільтру (*loop filter*);

- моделювання, аналіз характеристик кільця, корекція параметрів окремих ланок.

- Вибір цифрового модуля, перебудовується генератора і опорного генератора і режимів їх роботи пов'язаний в першу чергу з динамічними характеристиками синтезатора. Вибір петлевого фільтру є заключним етапом і багато в чому визначається вимогами до спектральних характеристик синтезованого сигналу. До числа їх відносяться: рівень дискретних паразитних складових, спектральна щільність потужності фазових флуктуацій при заданих відбудови по частоті, паразитне відхилення частоти в заданій смузі частот (ПОЧ), паразитне відхилення фази в заданій смузі частот (ПОФ).

Програма передбачає повернення до попередніх сторінок розрахунку за результатами поточного аналізу динамічних і спектральних характеристик. Для цього достатньо скористатися кнопкою Back. Після завершення всього проекту свій вибір можна змінити за допомогою кнопки (Edit/PLL Configuration) на головній панелі.



1. Основні етапи проектування

1.1. Попередній вибір цифрового модуля

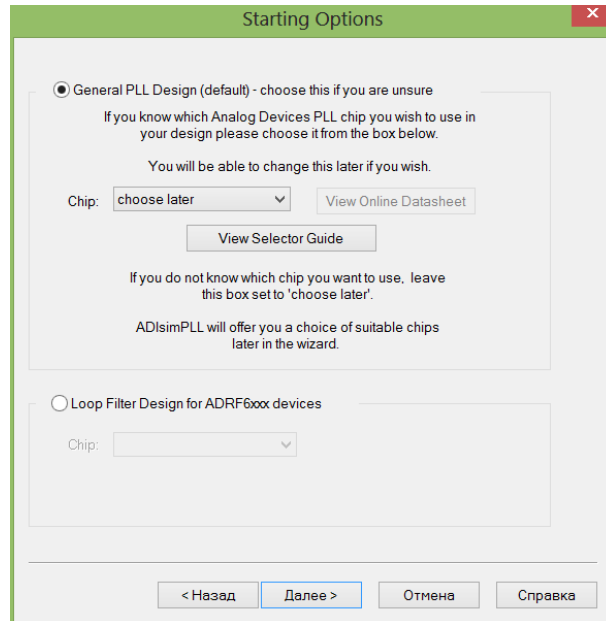


Рис. 1. Попередній вибір цифрового модуля

У вікні на рис. 1 ви вказуєте цифрову мікросхему, з якої заздалегідь визначилися або вибираєте мікросхему із запропонованого списку. В іншому випадку виберіть опцію *choose later*. Опція *View Online Datasheet* дозволяє отримати додаткову інформацію про мікросхемі на сторінках сайту фірми Analog Devices www.analog.com. У таблиці *View Selector Guide* описані наступні властивості мікросхем:

Config - конфігурація мікросхеми (*single* або *dual*);

Type - тип мікросхеми (з цілим (*int-N*) або дробним (*frac- N*) коефіцієнтом ділення);

VCO - yes, якщо перебудовується генератор вбудований в мікросхему, no, якщо не вбудований;

F_{min} - мінімально допустима частота перебудови VCO, МГц;

F_{max} - максимально допустима частота перебудови VCO, МГц;

PN Floor - граничне значення спектральної щільності потужності фазового шуму, віднесене до потужності несучої, дБс/Гц;

Max Ref - мінімально допустима частота опорного генератора, МГц;

$V_{cc} (min)$ - мінімальна напруга живлення, В;

$V_{cc} (max)$ - максимальна напруга живлення, В;

V_p - допустима напруга зарядним накачування, В;

I_{cc} - робочий струм, мА.

1.2. Вибір типа синтезатора

Початковий етап виконується за допомогою вікна, наведеного на рис. 2. Вказуються такі ознаки синтезатора:

The PLL has to: необхідно вказати, синтезується діапазон частот або сигнал певної частоти.

The PLL is: виберіть тип коефіцієнта ділення, який може бути цілочисельним або дробовим.

SimPLL should: в разі синтезу діапазону частот при необхідності можна виконати перевірку можливості бути реалізованим діапазону за допомогою функції Check that.

I want to specify the: задайте крок частотної сітки або частоту фазового детектора.

За допомогою вікна на рис. 3 Задайте фрагмент синтезованих частот, частоту фазового детектора, частоту опорного генератора.

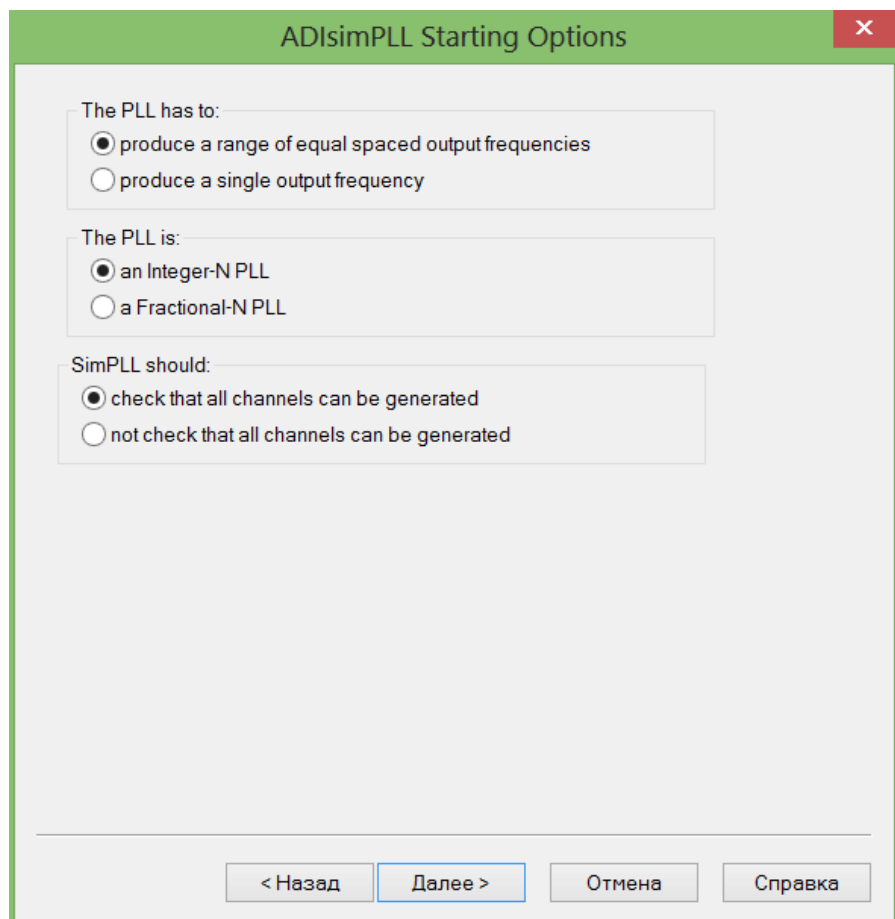


Рис. 2. Визначення частотних вимог

Output Frequency Requirements

Specify the Output Frequency requirements for your PLL synthesizer

For chips with a doubler output, (e.g. ADF5355) enter details for the non-doubled output. See Help for more details.

Minimum Frequency

Maximum Frequency

Phase Detector Freq

Channel Spacing equals the Phase Detector Frequency for Integer-N PLL's unless an external prescaler is used.

☐ Use an External Prescaler

If you have a given reference frequency that you must use then check the box below and enter the frequency. Otherwise the reference frequency can be selected later.

☐ Use Reference Frequency of:

All frequencies are entered in Hz. To enter 10MHz simply type "10M" or "10e6", to enter 22.5kHz type "22.5k" or "22.5e3" and so on.

< Назад **Далее >** Отмена Справка

Рис. 3. Завдання діапазону частот

У разі необхідності, виберіть попередній дільник

PLL Prescaler Selection

To use a prescaler choose "custom" and enter the division ratio, or select a library model.

☐ From Library Selector Guide

Prescaler Library

Prescaler Model

Div N

☒ Custom Division Ratio

Phase noise details can be entered later.

Frequency to PLL chip will be from 50.0MHz to 65.0MHz
Channel spacing will be 50.00kHz (= 2 x 25.00kHz)

< Назад **Далее >** Отмена Справка

Рис. 4. Вибір попереднього дільника

1.3. Вибір цифрового модуля

ADISimPLL пропонує Вам свою бібліотеку мікросхем серії ADF, параметри яких вказані в таблиці **Selector Guide**. Підключення опції **Only list chips covering frequency range** обмежує Ваш вибір тими мікросхемами, які задовольняють заданим частотним вимогам. Також можна вибрати додаткові функції: детектор контролю синхронізму **Lock Detect** і режим швидкого захоплення частоти **Speedup Type (Fast Lock)**, якщо вони підтримуються Вашою мікросхемою. Введіть напруга живлення в ланцюзі підтримки заряду V_p .



Рис. 5. Вибір цифрового модуля

1.4. Вибір петлевого фільтру

У наступному вікні Ви вибираєте фільтр, необхідний для виконання проектування. Бібліотека містить пасивні і активні фільтри. Детальний опис можна знайти в Help Loop Filter. Для активного фільтра можна вибрати модель операційного підсилювача із запропонованого списку Op Amp Model. Якщо потрібної моделі не існує, то виберіть Custom і задайте параметри пізніше

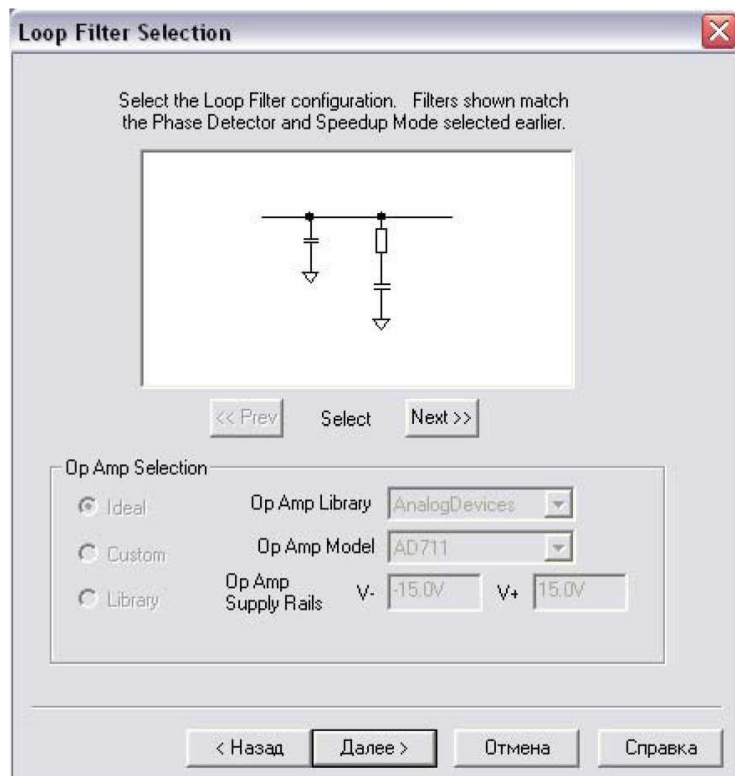


Рис. 6. Вибір петлевого фільтру

1.5. Вибір керованого генератора (VCO)

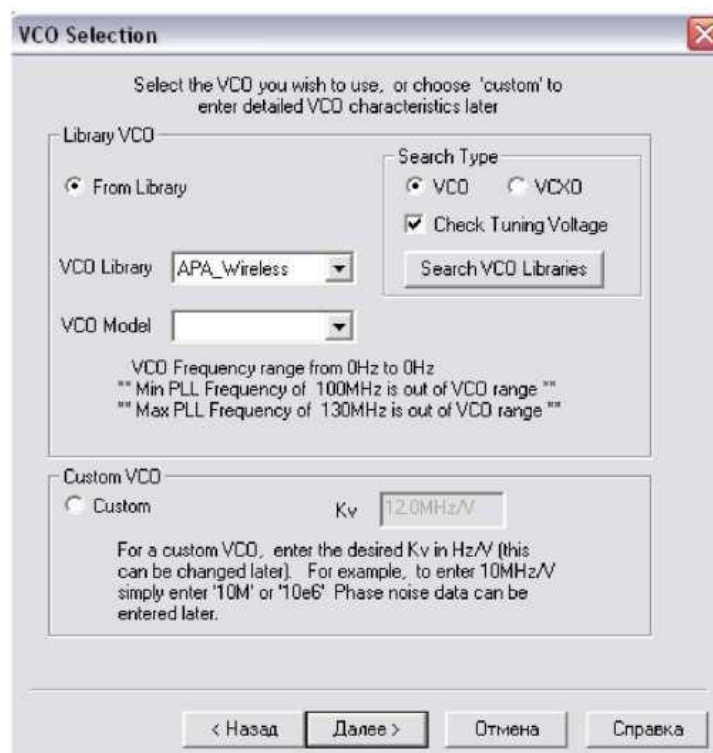


Рис. 7. Вибір перебудовується генератора (VCO)

Генератор можна вибрати із запропонованої бібліотеки. Всі параметри VCO зведені в таблицю Search VCO Libraries:

Part # - номер генератора;

Library - назва бібліотечного файлу;

F_{min} - мінімальна частота перебудови, МГц;

F_{max} - максимальна частота перебудови, МГц;

K_v - крутизна VCO, МГц/В;

V_{min} - мінімальна напруга, необхідне для перекриття частотного діапазону;

V_{max} - максимальна напруга, необхідне для перекриття частотного діапазону;

P_{noise} - спектральна щільність потужності фазового шуму на частоті 10 кГц, дБс/Гц;

P_{out} - Вихідна потужність;

C_t - ємність, пФ;

V_{cc} – напруга живлення, В.

Если необходимого Вам генератора нет в предложенной библиотеке, то Вы можете створити свій бібліотечний файл з характеристиками цього генератора (див. далі) або вказати крутизну, а дані по фазового шуму внести пізніше.

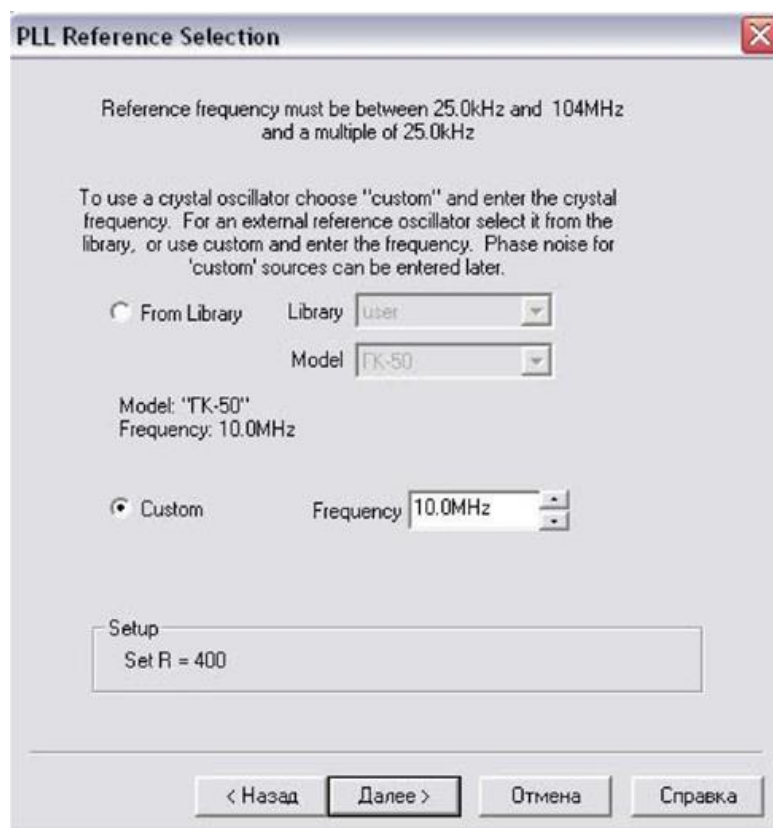


Рис. 8. Вибір опорного генератора

1.6. Вибір опорного генератора (Reference)

Подібно VCO, опорний генератор можна вибрати зі створеного Вами бібліотечного файлу, або вказати частоту генератора з наступним визначенням фазових шумів.

Set R - коефіцієнт розподілу в ланцюзі опорного генератора.

1.7. Завдання параметрів стійкості

Після вибору всіх компонентів синтезатора необхідно задати параметри стійкості системи ІФАПЧ. Для цього в наступному вікні вказують запас стійкості по фазі **Phase Margin**. Запас стійкості по фазі визначається виразом $\Delta\varphi_3 = 180^\circ + \varphi(\omega_c)$, где $\varphi(\omega_c)$ - аргумент коефіцієнта передачі розімкнутого кільця на частоті одиничного посилення (модуль коефіцієнта передачі дорівнює 0 дБ). Дану частоту називають частотою зрізу кільця (**Loop Bandwidth**). Зазвичай ці параметри виставлені за замовчуванням. Частота зрізу вибирається як $\omega_c = 0,1\omega_0$ (10% від робочої частоти фазового детектора), а значення $\Delta\varphi_3 = 45^\circ$. У вікні можна вказати інші значення або змінити їх пізніше на інформаційній панелі (**Data Panel**).

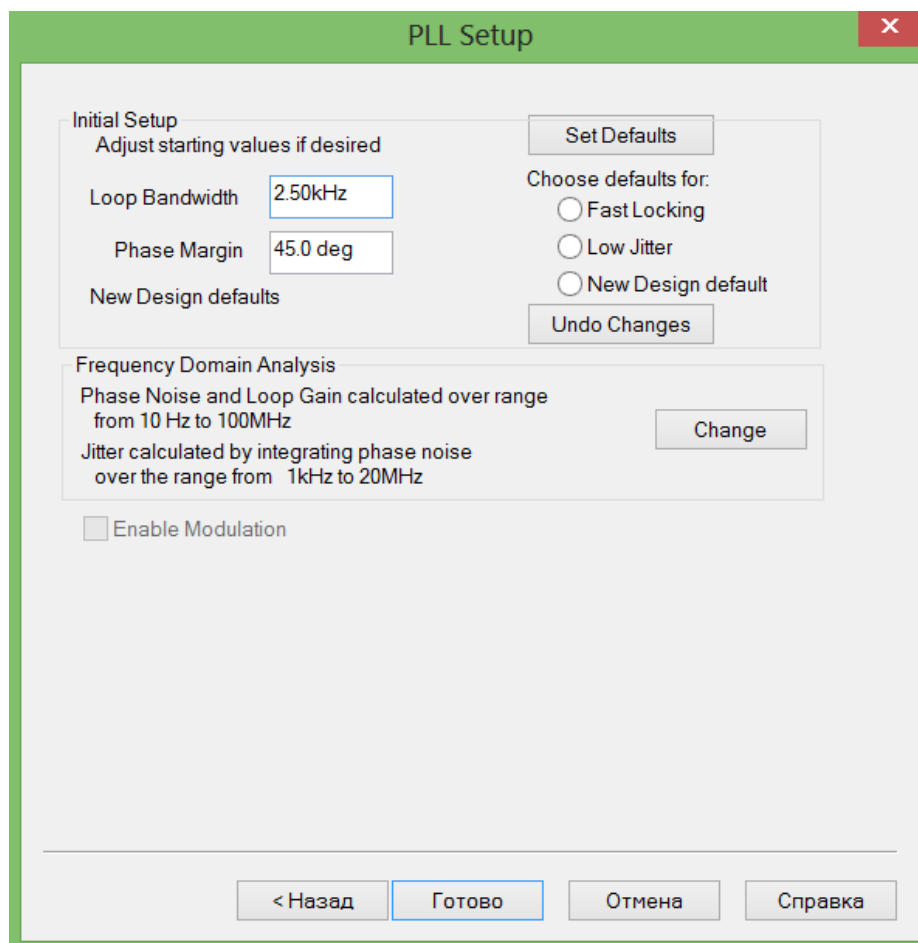


Рис. 9. Вибір параметрів стійкості

2. Основне вікно програми

Після установки всіх параметрів системи натисніть кнопку **Готово**, тим самим перейдете на основну сторінку. В основному стані сторінка розділена на дві частини, як це показано на рис. 10.

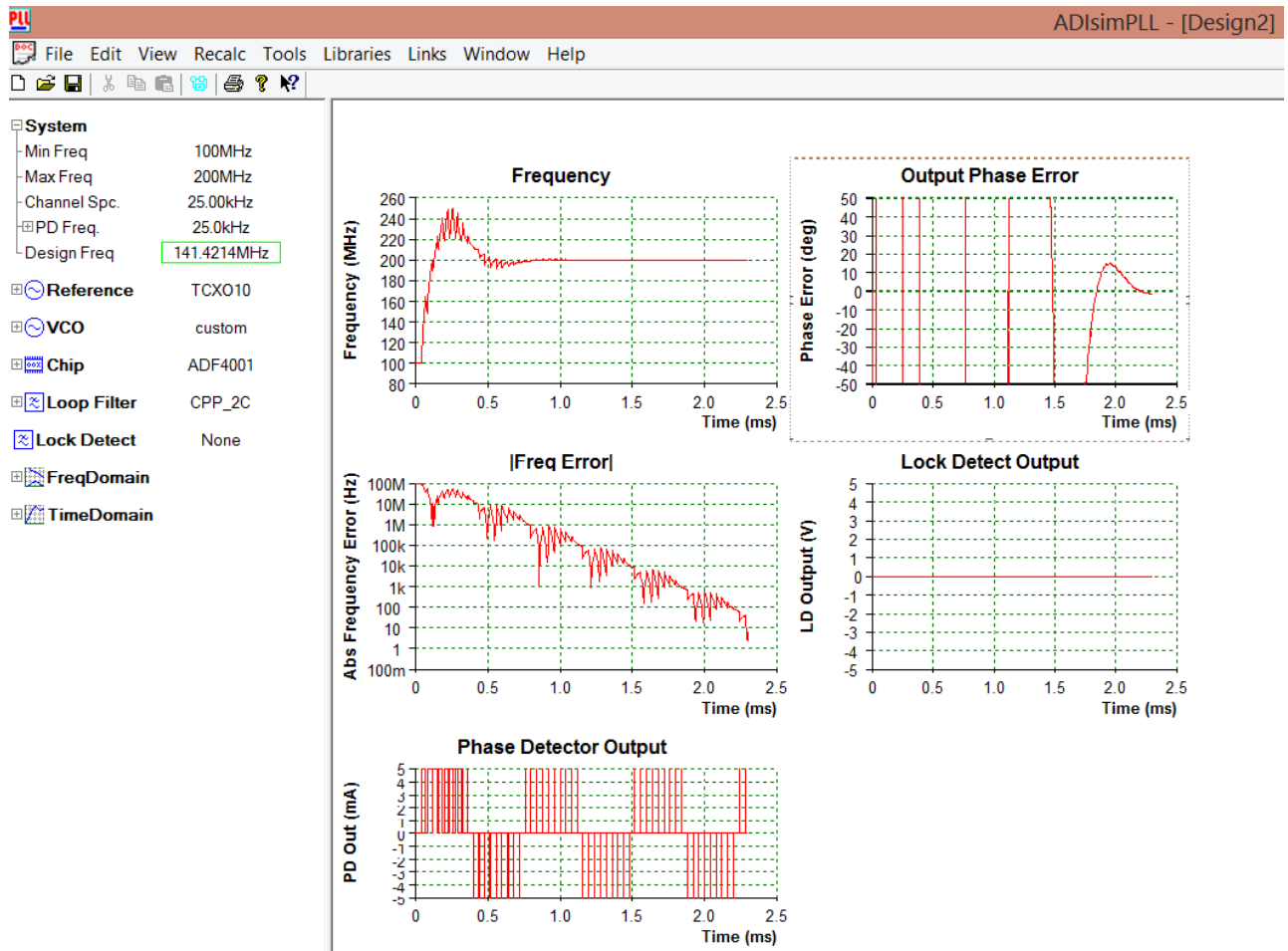


Рис. 10. Головна сторінка програми

Інформаційна панель **Data Panel** - це область електронної сторінки, яка відповідає за параметри системи. Тут можна змінювати значення параметрів, що вводяться раніше.

Панель результатів **Results Panel** - ця область електронної сторінки, яка відображає результати роботи системи.

Панель сервісні повідомлення **Message Panel** відображає повідомлення про помилки. Вона з'являється і зникає автоматично.

2.1. Інформаційна панель (Data Panel)

Інформаційна панель дозволяє редагувати параметри системи, які були

задані раніше на етапі розробки. Дані розміщені ієрархічним способом. У виділеній осередку значення параметра можна змінити за допомогою кнопок **Page Up** и **Page Down**, при цьому результати в Results Panel змінюються автоматично.

В розділі **System** редагуються частотні параметри системи:

Min Freq - мінімальна частота синтезованого діапазону, МГц;

Max Freq - максимальна частота синтезованого діапазону, МГц;

Channel Spc - крок частотної сітки (частота дискретизації), кГц;

PD Freq - робоча частота фазового детектора, кГц;

Ref Divider - коефіцієнт розподілу опорного подільника;

Design Freq - частота аналізу (синтезируемая частота, на якій виконується попередній аналіз характеристик синтезатора). За замовчуванням вибирається рівної $\sqrt{F_{\max} F_{\min}}$.

В розділі **Reference** редагуються вимоги на опорний генератор:

Frequency - частота опорного генератора, МГц;

Phase Noise - спектральна щільність потужності фазового шуму, внесеного опорним генератором, дБс/Гц. Спектральна щільність (СП) потужності фазового шуму задається по одній з наступних моделей:

1. None - фазовий шум відсутній;
2. Corner/Floor

Спектральна щільність задається модифікованим виразом Лисона:

$$L(f_m) = N_{floor} \cdot \left(1 + \frac{f_c^2}{f_m^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{f_f}{f_m}\right) \quad (1)$$

де f_m - частотна відбудова від несучої;

N_{floor} - граничне значення фазового шуму (рівень білого шуму);

f_c - значення частоти, на якій перетинаються дві апроксимуючі прямі: пряма білого шуму і пряма з нахилом 20 дБ / дек. Наочно це відображено на рис.11 (частота **corner frequency**);

f_f - значення частоти, на якій перетинаються апроксимуючі прямі з нахилом 20 дБ / дек і 30 дБ / дек (**flicker corner**, зазвичай покладається рівною нулю).

Спектральна щільність фазового шуму, побудована відповідно до моделі (1), наведена на рис. 11.

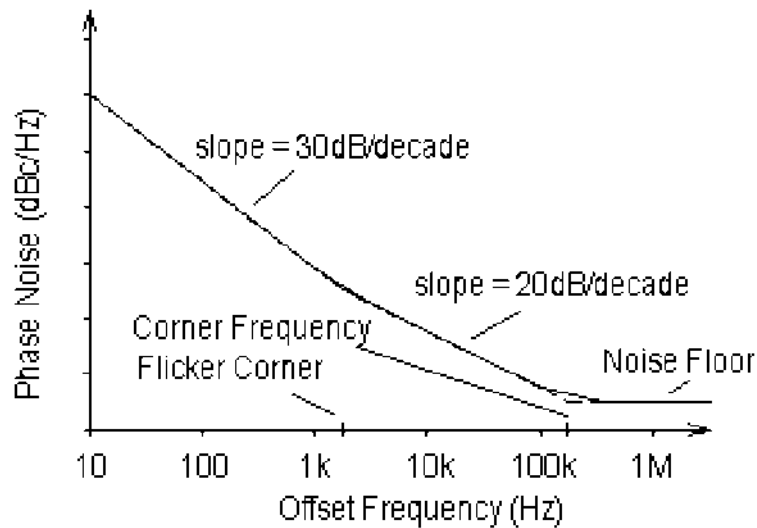


Рис. 11. СП потужності фазового шуму по моделі Corner/Floor

Таким чином, якщо ви хочете поставити СП фазового шуму, спираючись на дану модель, необхідно ввести два параметри: рівень білого шуму **PN Floor** і значення частоти **Corner Freq.**

3. Leeson

Спектральна щільність задається за моделлю Лисона відповідно до наступного виразу:

$$L(f_m) = \frac{FkT}{2P_{avs}} \cdot \left(1 + \frac{1}{f_m^2} \cdot \left(\frac{f}{2Q_L}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{f_f}{f_m}\right) \quad (2)$$

де F - коефіцієнт шуму активного елементу генератора (**Noise Figure**);

P_{avs} - потужність коливань на виході активного елементу генератора (**Resonator Power**);

Q_L - навантажена добротність резонатора (**Loaded Q**);

$f/2Q_L$ - половина смуги пропускання ланцюга зворотного зв'язку за рівнем половинної потужності;

f - частота генератора (відповідає частоті **Test Freq.**);

k - постійна Больцмана;

T - абсолютна температура.

4. Point/Floor

Спектральна щільність задається згідно (1), при цьому необхідно визначити рівень білого шуму **PN Floor** і точку, через яку буде проходити крива **Phase Noise at Freq.** Це відображено на рис. 12.

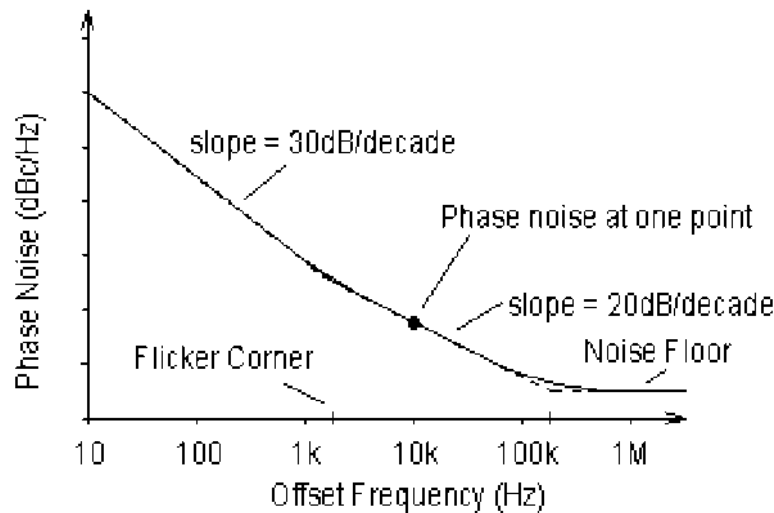


Рис. 12. СП потужності фазового шуму по моделі **Point/Floor**

5. Table

Щоб використовувати цей спосіб, необхідно помістити інформацію про генератор в бібліотеку даних (див. Далі). СП фазового шуму будується по табличних значень, між точками використовується лінійна інтерполяція. Це показано на рис. 13.

Можна відзначити, що модель СП фазового шуму **Point/Floor** є найбільш зручною для швидких досліджень. Якщо Ви хочете дослідити реальні генератори, то використовуйте табличні дані.

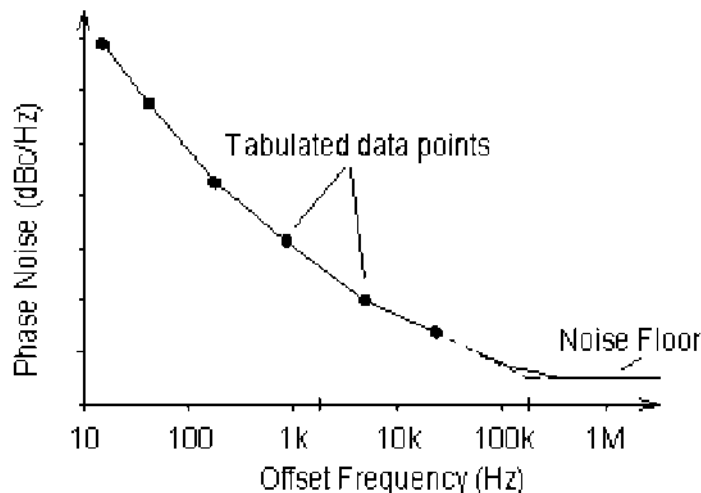


Рис. 13. СП фазового шуму по табличних значень

В розділі перебудовується генератор **VCO**

Tuning Law - характеристика управління перебудовується генератора (ПГ), яка показує залежність вихідної частоти ПГ від керуючої напруги. Її можна задати декількома способами:

1. Перестроюваний генератор **VCO** описується наступними параметрами:
 K_v (ideal)

Залежність частоти від напруги, носить строго лінійний характер, як це показано на рис. 14. та визначається крутизною K_v і початковою точкою $f(0)$.

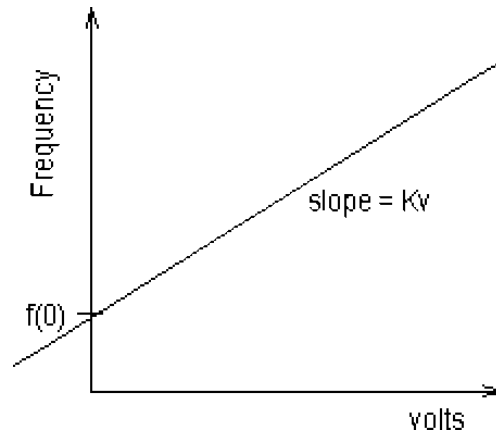


Рис. 14. Характеристика управління ПГ способом K_v (ideal)

2. 2 point

Характеристика управління лінійна і задається за двома точками $F_1=F(V_1)$ та $F_2=F(V_2)$.

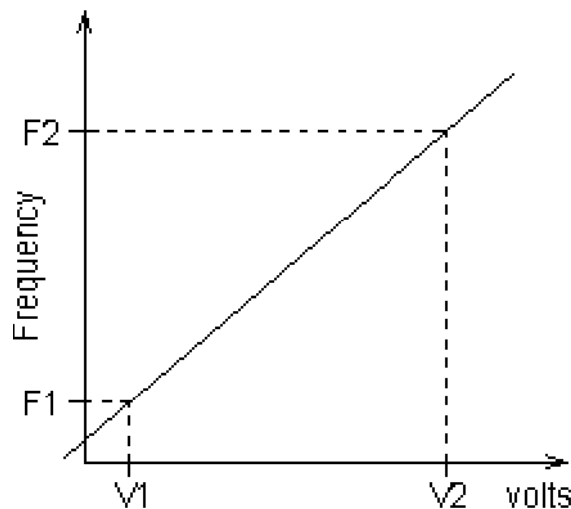


Рис. 15. Характеристика управления ПГ (способ 2 point)

3. Datasheet K_v

Характеристика управління задається по крутизні K_v і точці з координатами $F((V_1+V_2)/2)=(F_1+F_2)/2$, як це показано на рис.16.

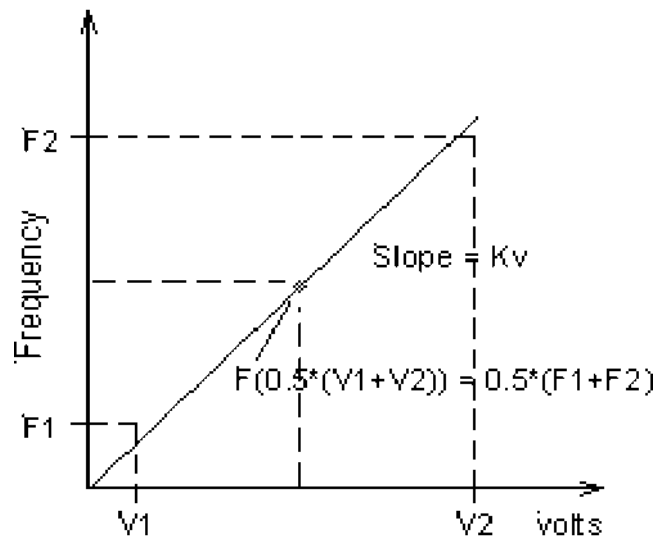


Рис. 16. Характеристика управління ПГ (список Datasheet K_v)

4. Table

Характеристика управління ПГ будується по табличних значень, які прописані в бібліотечному файлі. Між точками використовується лінійна інтерполяція, як показано на рис. 17.

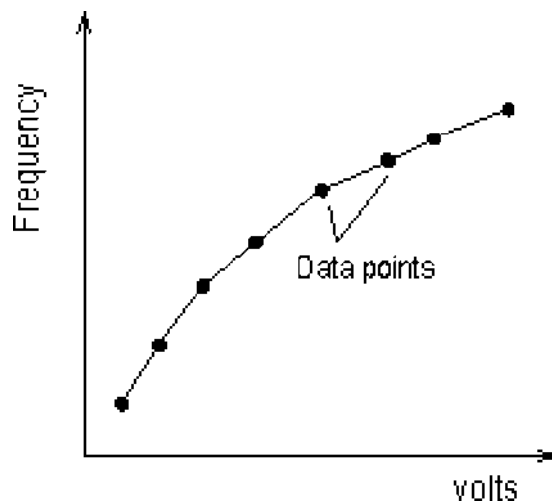


Рис. 17. Характеристика управління ПГ (табличні значення)

Способи завдання СП фазового шуму такі ж, як у випадку опорного генератора.

В розділі **Chip** вибираються режими і параметри обраної цифровий мікросхеми.

В полі ***Mode*** задається робочий режим мікросхеми. Якщо вона не підтримує функцію швидкого захоплення ***Fast Lock***, то для неї доступний тільки нормальний режим роботи (***Normal***). Інакше, можливо три варіанти.

Режим	Частотна область	Аналіз перехідних процесів
Normal	Аналіз системи відбувається в стані синхронізма (смуга захоплення вузька)	Смуга захоплення збільшується протягом перехідного процесу, а потім назад звужується згідно таймером
FL off	Те ж саме, що і <i>Normal</i>	Смуга захоплення зберігається вузької
FL Always	Аналіз виконується при широкій смузі захоплення	Смуга захоплення зберігається широкої протягом всього перехідного процесу

Широке поширення отримали двухмодульної попередні подільники частоти - «прескалери». Вони забезпечують режим поділу на P і $P + 1$, де P - модуль прескалера (Prescaler p). Їх застосування дозволяє підняти робочу частоту ДПКД до декількох ГГц (наприклад, до 4 ГГц у цифрового модуля ADF4113, до 6 ГГц у модуля ADF4106). Суттєвою особливістю двухмодульної ДПКД є обмеження на мінімальний коефіцієнт ділення (*Min Ctgs Divider*) - він не може бути менше, ніж $P(P-1)$.

Наприклад, мінімальний модуль прескалера $P_{\min} = 8$ дозволяє забезпечити $K_{\min}=56$.

Counter Bits - кількість біт в лічильнику;

Min Value - мінімальне значення коефіцієнта ділення;

Max Freq. - максимальне значення коефіцієнта ділення;

Max PS Out Freq. - максимальна частота з виходу попереднього дільника;

Min Freq. - мінімальна робоча частота подільника.

В полі *Reference Divider* задаються параметри опорного подільника:

Counter Bits - кількість біт в лічильнику опорного подільника;

Min Value - мінімально допустиме значення коефіцієнта ділення;

Max Freq. - максимальна робоча частота подільника;

Min Freq. - мінімальна робоча частота подільника.

До складу мікросхеми входить частотно-фазовий детектор (*Phase Detector*), який доповнений ланцюгом підтримки заряду (зарядова накачування *Charge Pump*). Така побудова фазового детектора з зовнішніми ланцюгами дозволяє в режимі синхронізму забезпечити тимчасове неузгодженість між однойменними перепадами імпульсів опорного коливання і наведеного не більше одиниць наносекунд. Параметри ЧФД наступні:

CP Current - величина струму накачування;

R_{set} - зовнішній резистор, опір якого пов'язане зі струмом накачування

наступним виразом для серії ADF $R_0=0$;

Leakage Current - струм витоку;

V_p - напруга живлення в ланцюзі підтримки заряду;

V_{min} - мінімальне значення напруги на виході ЧФД, за замовчуванням приймається рівним нулю;

V_{max} - максимальне значення напруги на виході ЧФД, за замовчуванням приймається рівним V_p ;

F_{max} - максимальна робоча частота ЧФД;

PN Floor - граничне значення шуму, що вноситься ЧФД (рівень білого шуму).

На виході кожного модуля серії ADF 4000 має режим «контроль синхронізму» (**Lock Detect**), дозволяє визначати наявність або відсутність синхронізму в кільці. Формується вихідний сигнал індикації захоплення частоти. На рис. 18 наведені тимчасові діаграми роботи ЧФД при різних поєднаннях приходу однойменних фронтів імпульсів опорного f_r і перебудовується f_p коливаль. Третій рядок показує форму сигналу на виході детектора контролю синхронізму LD.

Зазвичай до виходу LD під'єднують інтегруючу RC - ланку для того, щоб отримати практично постійна напруга - логічний «0» або «1». Напруга на виході ЧФД позначено як D_0 .

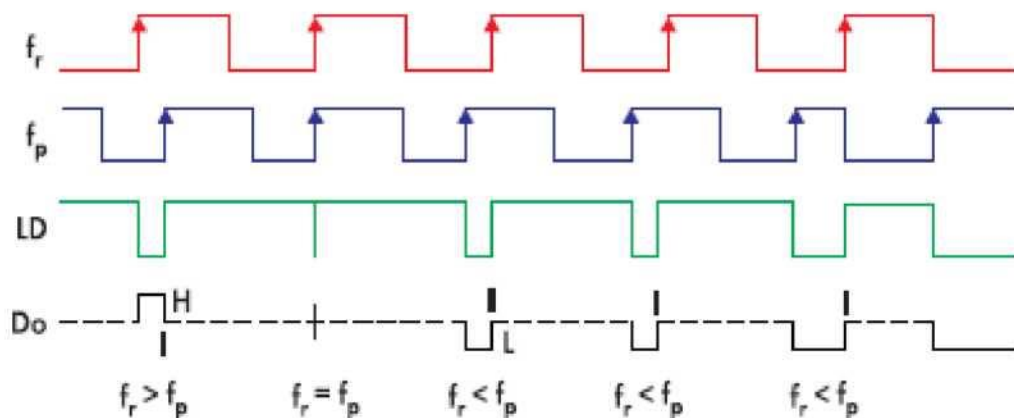
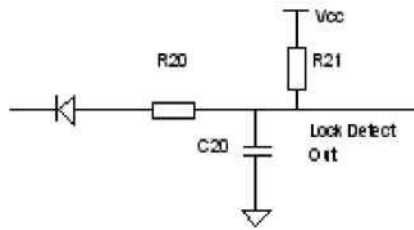


Рис. 18. Тимчасова діаграма роботи ЧФД

Можна вибрати один з режимів **Lock Detect**:

None - детектор контролю синхронізму відсутня;

Open Drain O/P - логічний вихід з відкритою витоком, до якого приєднується зовнішній аналоговий фільтр такого вигляду:



Digital filter - пряме з'єднання мікросхеми з виходом детектора.

Необхідно задати параметри:

V_{low} - напруга з виходу ланцюга **Lock Detect** в режимі LOW;

V_{high} - напруга з виходу ланцюга **Lock Detect** в режимі HIGH;

T_{pass} - максимальна тривалість імпульсу з виходу ЧФД, який буде віднесений до синхроімпульсів;

N_{pass} - кількість синхроімпульсів, яке необхідно для визначення синхронізму в системі. Вихід **Lock Detect** в стані HIGH;

T_{fail} - якщо приходить імпульс, який перевищує цю тривалість, то система виходить із стану синхронізму. Вихід **Lock Detect** в стані LOW.

Для того щоб прискорити захоплення при зриві синхронізації, застосовують схему «швидкого захоплення» (**Fast Lock**). Ця схема сприяє збільшенню струму ЧФД в процесі переходу на іншу частоту, що скорочує час встановлення частоти.

У режимі «швидкого захоплення» можливо програмований перемикання вихідного струму ЧФД зі стандартного режиму (low) 250 мкА в режим (high) 1 мА протягом 3 - 63 періодів частоти порівняння з кроком чотири періоди (тобто 3, 7, 11 і т.д. до 63) в залежності від параметрів петлі.

Збільшення струму ЧФД під час перехідного процесу способствує його форсуванню, тобто зменшення часу перемикання з частоти на частоту за рахунок короточасного збільшення коефіцієнта посилення кільця ІФАПЧ.

У даній програмі цей режим називається **Speedup Mode** - режим прискорення перехідних процесів. Не всі мікросхеми його підтримують.

Для забезпечення режиму **Speedup Mode** необхідно:

- 1) змінити конфігурацію PLL (**Edit/PLL Configuration**);
- 2) У вікні **PLL Chip Selection** вибрати мікросхему, яка підтримує **Speedup Type/Switched Rj**;
- 3) на інформаційній панелі в розділі **Chip/Speedup Type** обрати **SWR₁ 2*BW**.

В результаті паралельно петлевий фільтру буде підключений додатковий резистор R1, ток зарядної накачування збільшиться в чотири рази, а смуга захоплення - вдвічі. Присутність режиму **Speedup Mode** наочно відображається

на перехідних процесах. Задаються наступні параметри:

Ext Timer - зовнішній таймер, який відповідає за початок і закінчення режиму «швидкого» захоплення. Вводиться постійна часу Timeout Period. Після закінчення цього періоду система перемикається в нормальний режим роботи.

Ref Counter - механізм паузи, який повертає систему в нормальний режим роботи після фіксованої кількості циклів **Ref Intervals**. Наприклад, якщо частота ЧФД дорівнює 10 кГц, вводячи значення **Ref Int=20**, Ми забезпечуємо режим «швидкого» захоплення протягом перших 2 мс.

Fast Lock I_{cp} - значення струму зарядної накачування протягом режиму «швидкого захоплення». Це значення має бути в 4 рази більше по відношенню до струму в **Chip/Phase Detector/Charge Pump Current**.

Charge Transfer - додатковий заряд, який потрібно підвести після завершення режиму **Speedup Mode**.

Блок **Loop filter** містить технічні вимоги до фільтру поряд з його компонентами.

Основним завданням петлевого ФНЧ є додаткова фільтрація перешкод з частотами, кратними частоті дискретизації. Крім того, важливою функцією фільтра є забезпечення необхідної АЧХ кільця і його безумовної стійкості.

Програма може розрахувати фільтр (його компоненти), які задовольняють критеріям стійкості, або проаналізувати роботу системи з заданим фільтром. Тому в поле **Specify** потрібно вибрати одне із запропонованих умов:

Phase Margin

В цьому випадку задається частота зрізу разомкнутого кільця і запас стійкості по фазі. З огляду на це автоматично розраховуються компоненти фільтра і Нуль / Полюси (**Pole/Zero**) передавальної функції розімкнутого кільця.

Pole/Zero

Зміною положення нулів і полюсів домагаються необхідного запасу стійкості по фазі.

Components

В цьому випадку можна змінювати значення компонентів фільтра, частота зрізу і запас стійкості по фазі будуть розраховуватися автоматично..

В полі **Freq Domain** задаються параметри для аналізу синтезатора в частотній області:

Min Freq, Max Freq - діапазон частот, в якому відбувається аналіз частотних залежностей;

Prt per Decade - кількість точок на декадні відстань.

Analysis at - частота аналізу, яка може змінюватися в межах синтезованого діапазону, наприклад, від 100 МГц до 130МГц, тоді коефіцієнт ділення **Int(N)** буде змінюватися від 4000 до 5200 при кроці сітки 25 кГц.

В полі ***Time Domain*** задаються параметри для аналізу перехідних процесів. Пропонується два способи аналізу:

Power On

В цьому випадку конденсатори петлевого фільтру розряджені і управляє вихідна напруга дорівнює нулю, тобто система спочатку знаходиться не в змозі синхронізму. Таким чином, під перехідним процесом тут розуміється процес захоплення частоти (***Frequency***) системою.

Freq Change

Цей спосіб аналізу показує роботу системи в режимі перемикання частоти. Відбувається перехідний процес входу в синхронізм на новій частоті, система переключається з частоти ***Start Freq*** на частоту ***New Freq***.

Stop Time - час симуляції перехідного процесу;

Max Time Step - розмір тимчасового кроку повинен бути менше періоду дискретизації.

Панель результатів (Results Panel)

Ця ділянка містить графічні сторінки: **Components, Time Domain, Freq Domain, Schematic**, та текстові: **Tutorial, Reports**.

Components Page

На цій сторінці представлені наступні характеристики:

VCO Phase Noise - спектральна щільність потужності фазового шуму перебудовується генератора (ПГ) на частоті аналізу;

VCO Freq vs Volts - керуюча характеристика ПГ;

VCO Kv vs Volts - крутизна ПГ;

Ref Phase Noise - спектральна щільність потужності фазового шуму опорного генератора (ОГ) на частоті аналізу;

Prescaler Phase Noise - спектральна щільність потужності фазового шуму попереднього діляника частоти.

Time Domain

На цій сторінці зображені перехідні процеси:

Frequency - залежність вихідної частоти синтезатора від часу в режимі захоплення;

|Freq Error| - зміна абсолютної частотної помилки з часом. Під частотної помилкою розуміється відхилення поточної частоти від частоти, на яку перебудовується система;

Phase Detector Output - тимчасова діаграма на виході ЧФД;

Output Phase Error - процес зміни фазової помилки в часі. Під фазової помилкою розуміється різниця між фазою на виході VCO реальної системи і фазою ідеальної системи (тобто системи, в якій відсутні перехідні процеси);

Lock Detect Output - форма сигналу на виході детектора контролю синхронізму. Високий рівень напруги (логічна «1») відповідає роботі системи в режимі захоплення, низький рівень (логічний «0») - синхронізації немає.


Freq Domain

В цій галузі представлені частотні залежності:

Open Loop Gain - АЧХ і ФЧХ коефіцієнта передачі розімкнутого кільця в логарифмічному масштабі;

Closed Loop Gain - АЧХ і ФЧХ коефіцієнта передачі замкнутої системи;

Phase Noise at - спектральні щільності потужності фазового шуму окремих компонентів системи і сумарна СП (Total);

 **Reference Spurs** (Leakage Spurs) - спектр дискретних побічних складових у вихідному сигналі;

FM Response - синтезатор на основі ІФАПЧ часто використовується в якості частотного модулятора. На рис. 19 показана структурна схема подібного синтезатора, де $m(s)$ - сигнал, який надходить на вхід модулятора, $\theta(s)$ - відгук на цей вплив:

$$\theta(s) = H(s) * m(s) \quad (3)$$

$$H(s) = \frac{K_v(s)}{s*(1+G(s))} \quad (4)$$

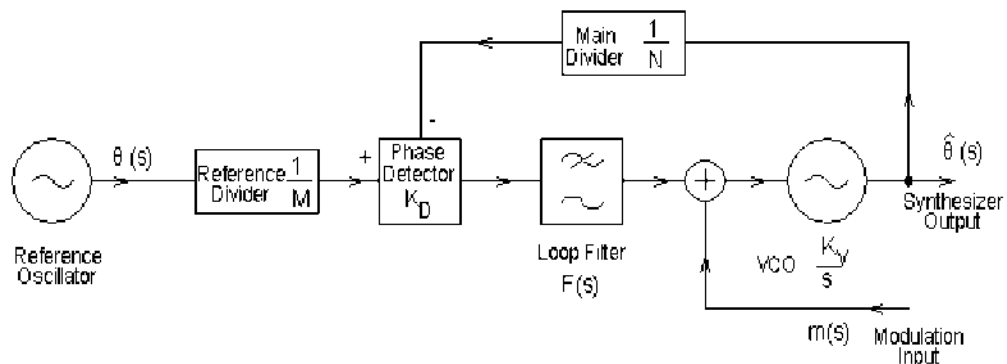


Рис. 19. Структурна схема синтезатора з функцією модуляції

На графіку **FM Response** представлені АЧХ і ФЧХ передавальної функції $H(s)$.

У вікні **Schematic** показана схема проєктованого синтезатора.

На сторінці відліку Report показано коротке резюме роботи синтезатора. Параметри цієї сторінки встановлюються в меню Edit / Report Options.

Phase Noise Table

Вся інформація по фазового шуму зведена в таблицю. Тут представлені СП потужності фазових шумів окремих компонентів системи і сумарна

характеристика **Total**. Розмір таблиці визначається частотним діапазоном, який можна регулювати в **Edit/Report Options/Phase Noise**. Можна регулювати наявність джерел шуму за допомогою індикатора. Виберіть на головному меню - **Tools/Individual Noise Control**. Біля кожного джерело шуму з'явиться індикатор:

- вказує, що пристрій є джерелом шуму;
- вказує, що пристрій не є джерелом шуму.

Reference Spurious

Рівень перших трьох паразитних дискретних складових (найбільш потужних).

Phase Jitter

Паразитне відхилення фази (ПОФ) в смузі частот від F_1 до F_2 . Смугу частот можна змінити в **Edit/Report Options/ Phase Jitter**. Для розрахунку ПОФ використовується формула:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\int_{F_1}^{F_2} L(f) df} \quad (5)$$

де – $L(f)$ сумарна СП потужності фазового шуму Total.

Residual FM

Паразитне відхилення частоти (ПОЧ) в смузі частот від F_1 до F_2 . Смугу частот можна змінити в **Edit/Report Options/ FM Mod**. Для розрахунку ПОЧ використовується формула:

$$\Delta f = \sqrt{\int_{F_1}^{F_2} L(f) f^2 df} \quad (6)$$

Transient Analysis of PLL

Параметри перехідного процесу: частота захоплення і час симуляції.

Frequency Locking

Околиця синтезується частоти і час потрапляння в цю околицю.

Phase Locking (VCO Output Phase)

Час, за яке фазова помилка досягає певного значення.

Lock Detect Threshold

Час, за який напруга з виходу детектора контролю синхронізму перевищить деяке порогове значення. Величину порога можна задати в **Edit/Report Options/ Lock Times**.

2.3. Панель службових повідомлень (Message Panel)

У цьому вікні з'являються попереджають повідомлення про помилку,

властивості якого можна змінити у вкладці View / Message Window / Properties на головній панелі. Підказку про помилку можна отримати наступним чином: правою кнопкою миші натисніть на повідомлення і виберіть Message Help або натисніть кнопку F₁.

Для першого ознайомлення з ADIsimPLL можна скористатися навчальною програмою (Help / Run Tutorial), де розробляють синтезатор з наступними параметрами:

Синтезується діапазон частот від 100 МГц до 130 МГц;

Крок частотної сітки 25 кГц;

Частота аналізу $\sqrt{F_{\max} F_{\min}} = 114$ МГц;

Частота зрізу 2.5 кГц;

Запас стійкості по фазі 45 градусів;

Струм зарядним накачування 5 мА.

Як детектор контролю синхронізму використовується Open Drain O/P.

3. *Перехідні процеси*

Розглянемо перехідні процеси. На рис. 20 показаний процес перебудови синтезатора з частоти 100 МГц на частоту 130 МГц. За цим графіком можна визначити тривалість перехідного процесу. Для точного визначення часу встановлення частоти збільште масштаб спостереження і використовуйте маркер (правою кнопкою миші на графік).

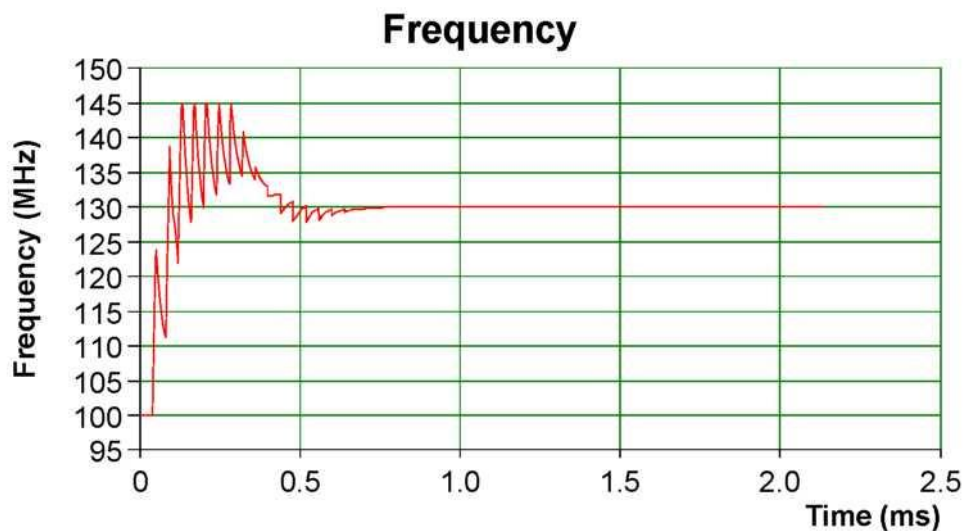


Рис. 20. Залежність вихідної частоти ПГ від часу

Визначимо час переходу в окіл синтезу частоти. Найпростіше це зробити за допомогою графіка на рис.21 | Freq Error |. Наприклад, час переходу в окіл 1 кГц складає 1.26 мс, а в окіл 10 Гц - 1.76 мс.

Ці значення також розташовуються у вікні Report (Frequency Locking).

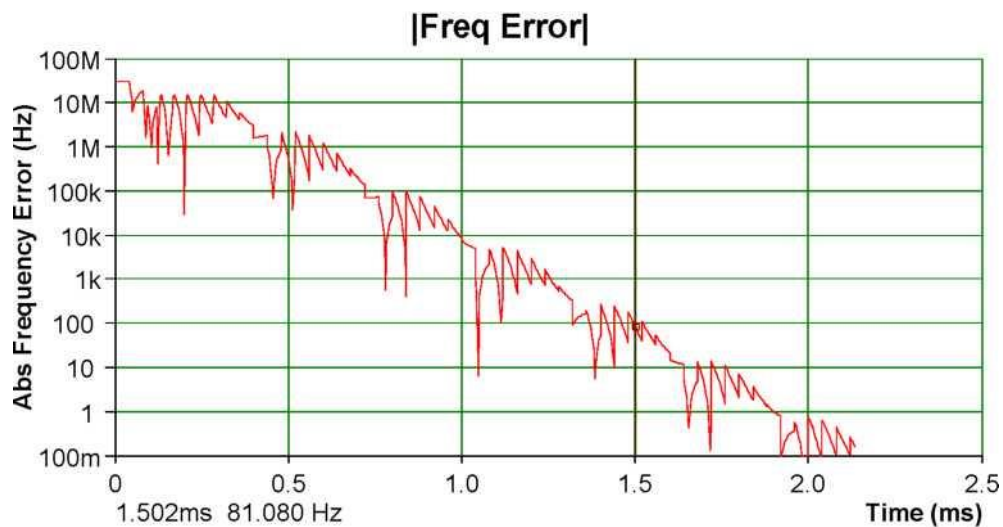


Рис. 21. Зміна абсолютної частотної помилки з часом

За графіком на рис. 22 можна визначити час, за який фазова помилка досягає певного значення. Наприклад, за час 1.25 мс різниця фаз досягає 10° , а за 1.53 мс - 1° . Ці значення наведені у вікні Report (Phase Locking).

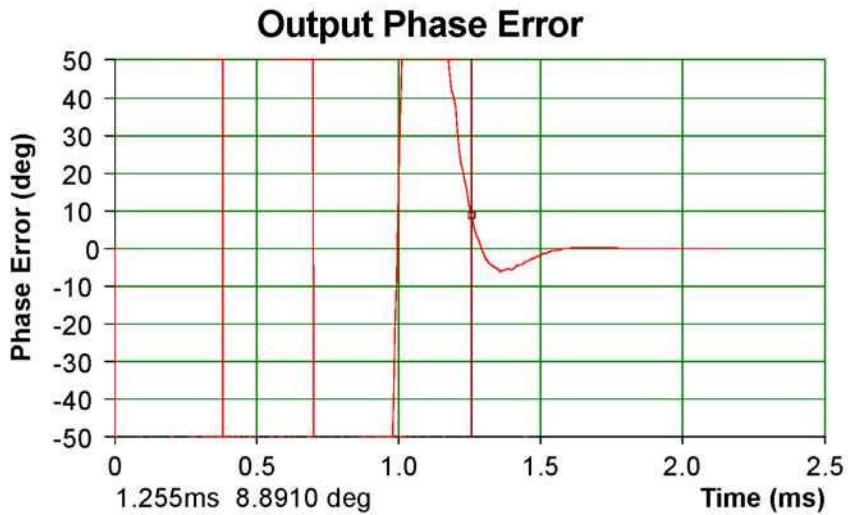


Рис. 22. Процес зміни фазового помилки в часі

Як відомо, основним завданням ЧФД є перетворення фазової помилки в керуючу напругу постійного струму. Реальний вихідний сигнал будь-якого ЧФД містить корисну складову, пропорційну різниці фаз приходять коливань, а також високочастотні складові, які проявляються у вигляді пульсацій і підлягають фільтрації. Причиною цього є наявність надлишкового електричного струму, в основному це струм витoku ЧФД.

Значення паразитного струму вказується у вікні Chip / Phase Detector / Leakage. На рис. 23 зображений спектр побічних складових при значенні струму 5нА.

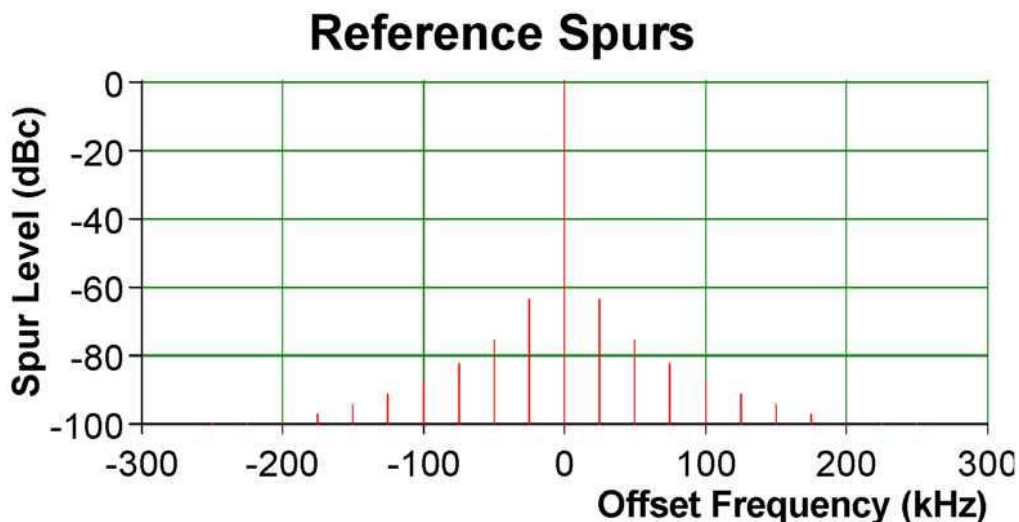


Рис. 23. Спектр паразитних складових в вихідному сигналі

Наявність паразитного струму позначається на перехідних процесах. Виставите значення струму витoku рівним нулю. Зафіксуйте діаграми | Freq Error |, Frequency, Output Phase Error. Це можна зробити наступним чином: правою

кнопкою миші натисніть на графік і виберіть функцію Save Trase. Змініть значення струму витоку на 5нА. Ви повинні отримати результати, зображені на рис. 24, 25, 26, де синій маркер відповідає нульовому значенню струму, а червоний - току витоку в 5нА.

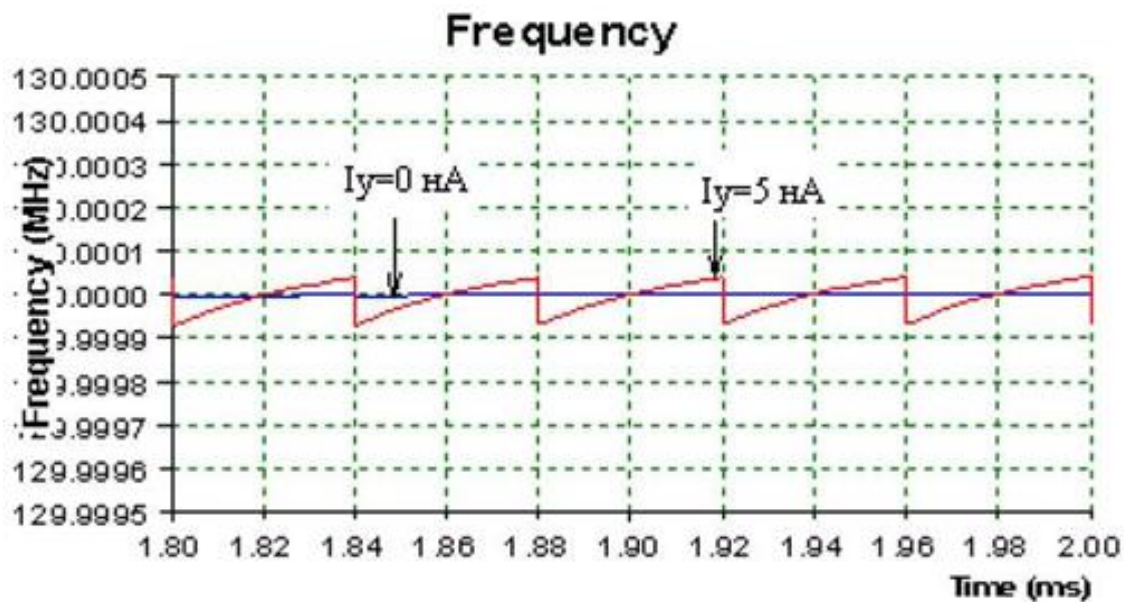


Рис 24. Залежність вихідної частоти синтезатора від часу при значеннях струму витоку 0нА та 5нА

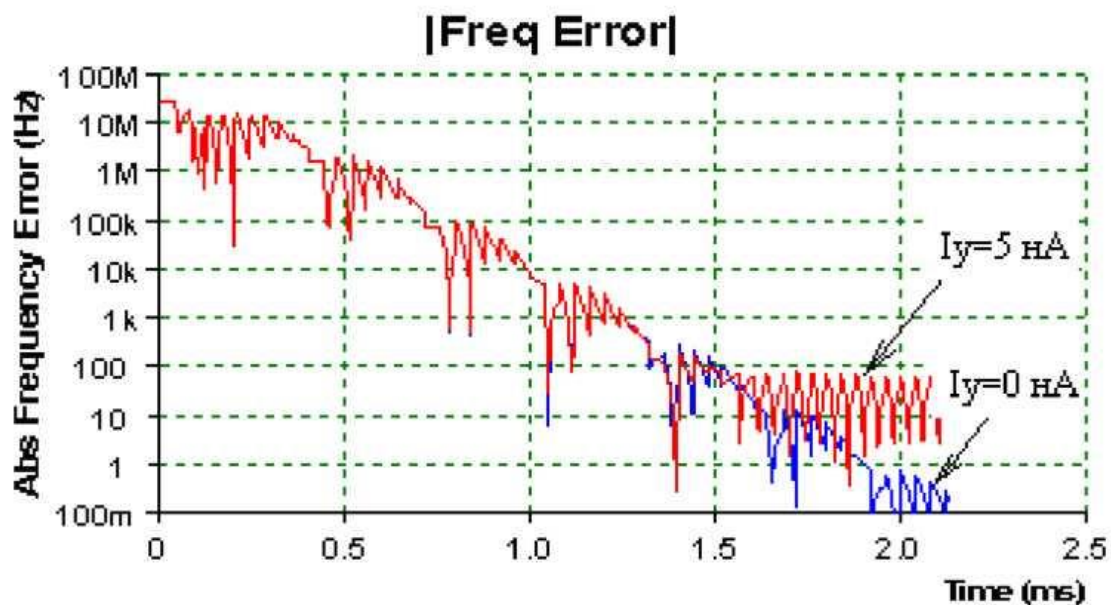


Рис. 25. Зміна абсолютної частотної помилки з часом при значеннях струму витоку 0 нА та 5 нА

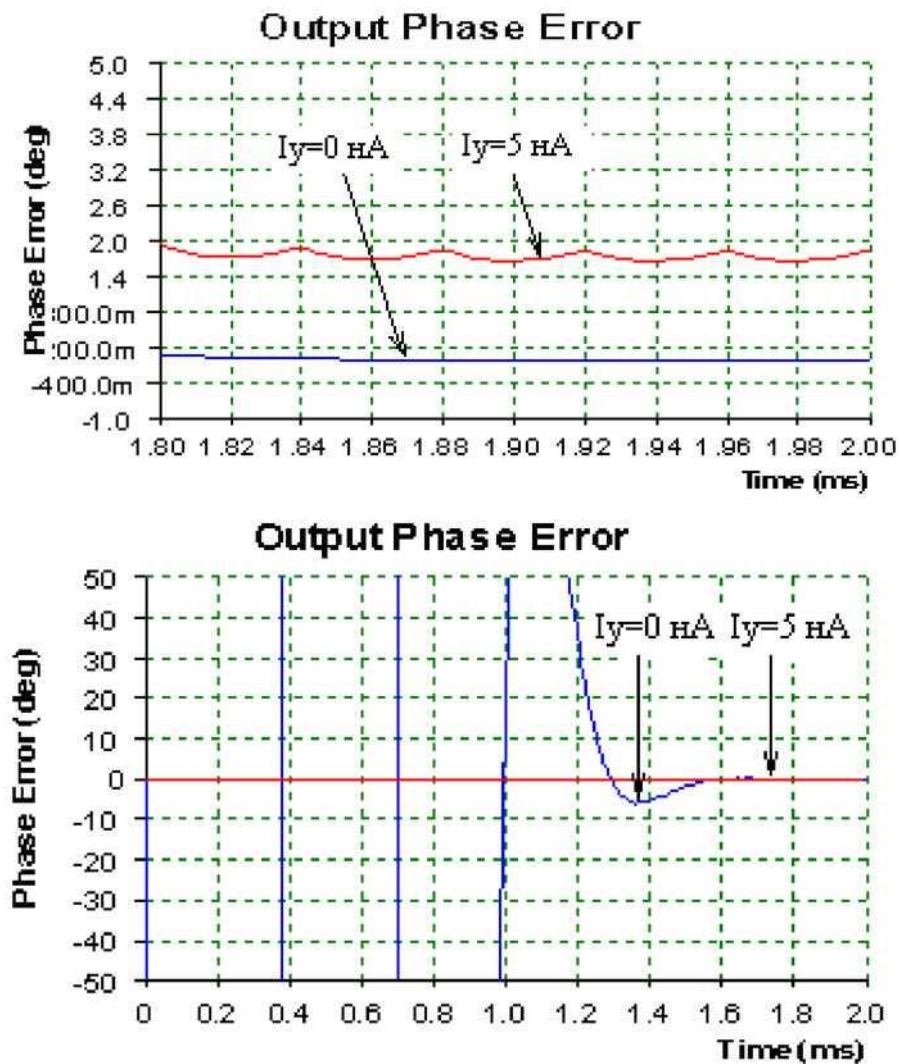


Рис. 26. Процес зміни фазової помилки в часі при значеннях струму витоку 0 нА та 5 нА

Проведемо аналіз перехідних процесів з урахуванням режиму швидкого захоплення частоти Speedup Type на прикладі мікросхеми ADF4116. На інформаційній панелі в полі Chip / Speedup Mode виберіть режим **SW R₁ 2BW**. Встановіть в поле Chip / Phase Detector / CP Current ток зарядним накачування 250 мкА, при цьому струм Fast Lock I_{cp} збільшиться в 4 рази. Рис. 27 відображає роботу системи в нормальному режимі і в режимі швидкого захоплення. Видно, що процес перемикання синтезатора з однієї частоти на іншу відбувається значно швидше.

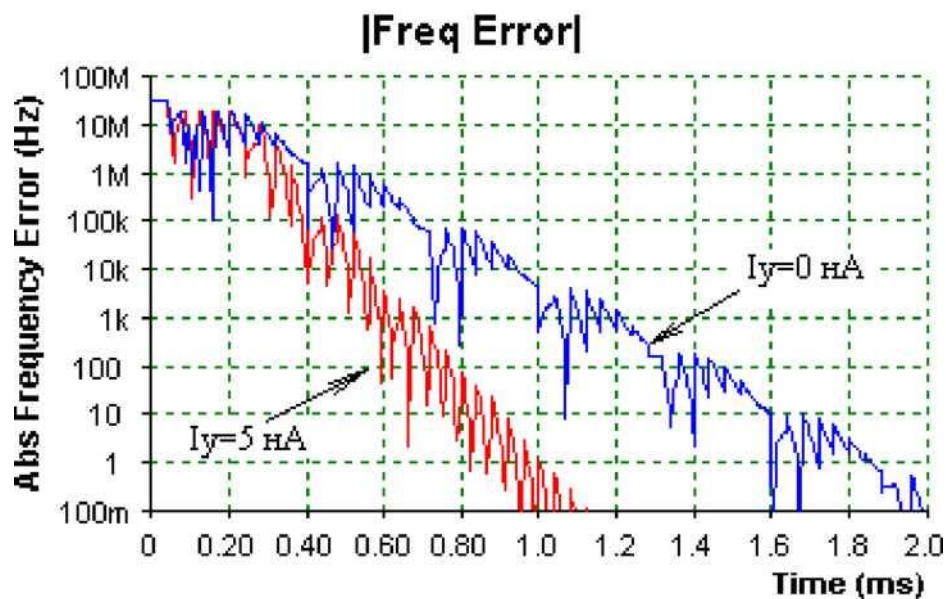


Рис. 27. Зміна абсолютної частотної помилки з часом в нормальному режимі і в режимі швидкого захоплення (при Ref Int= 63)

Встановіть в поле Chip / Speedup Mode / Timeout / Ref Intervals значення 20. Це буде відповідати тому, що при частоті ЧФД 25 кГц режим швидкого захоплення припиниться через 0.08 мс і система перейде в нормальний режим функціонування. Це показано на рис.28.

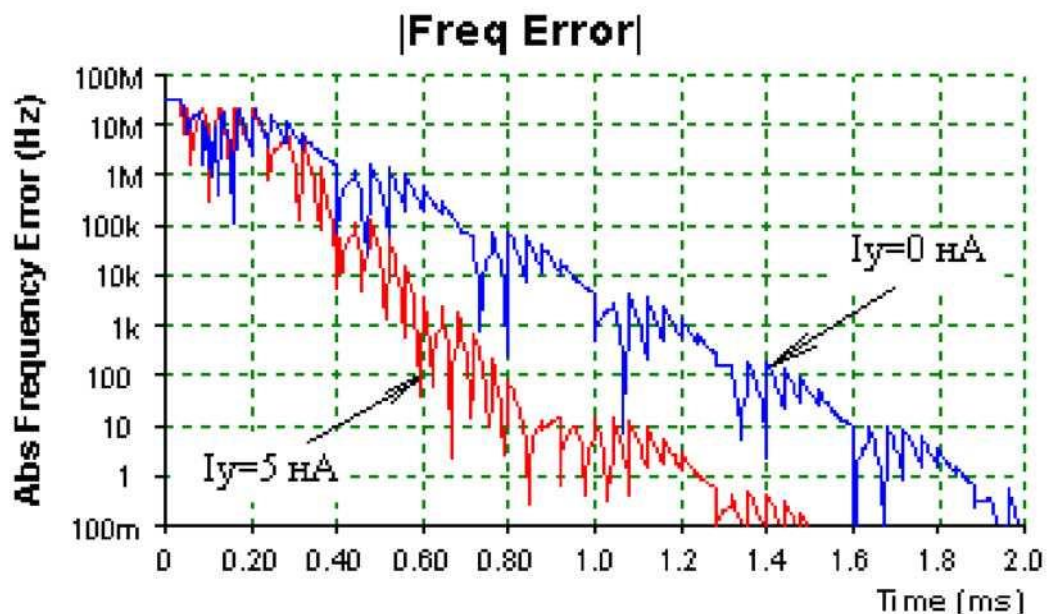


Рис. 28. Зміна абсолютної частотної помилки з часом в нормальному режимі і в режимі швидкого захоплення (при Ref Int=20)

4. Створення бібліотечних файлів

Для того щоб в програму ввести інформацію, наприклад, про перебудовувати або опорному генераторі, необхідно створити свою бібліотеку даних. Розміщення головного бібліотечного каталогу залежить від операційної системи. Для Windows 2000 / XP типове розміщення - C: / Documents and Setting / All User / Application Data / Applied Radio Labs / ADIsimPLL / lib.

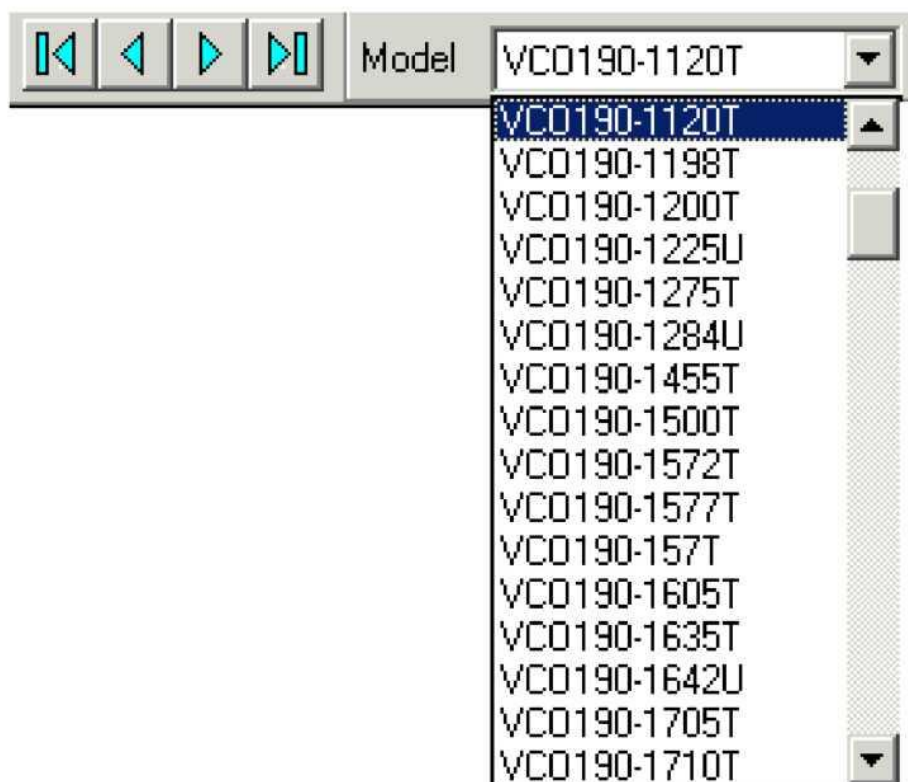
У головному бібліотечному каталозі існує п'ять директорій:

Каталог	Зміст
/lib/chip	бібліотека мікросхем
/lib/VCO	бібліотека VCO
/lib/Ref	Бібліотека опорних генераторів
/lib/OpAmp	Бібліотека активних фільтрів
/lib/Prescaler	Бібліотека попередніх делітелейфільтров

Для того щоб створити бібліотеку опорних і перебудовуються генераторів, можна скористатися **Library File Editor** або працювати з текстовою програмою (докладніше в **Help/Using Libraries/File Format**). На головній панелі інструментів виберіть **Libraries/VCO Library Editor** або **Libraries/Reference Library Editor** в Залежно від того, який тип генератора хочете створити.

Якщо Ви вже використовуєте генератор з бібліотеки і хочете редагувати його параметри, то скористайтесь **Libraries/Edit Current VCO** або **Libraries/Edit Current Reference**.

Управління файлом здійснюється за допомогою панелі інструментів. Всі моделі генераторів розміщені в алфавітно-цифровому порядку.



Можна створювати і видаляти моделі, використовуючи кнопки для редагування:



New - створює нову модель і прописує її назву в Edit Model Name;

Delete - видаляє обрану модель;

Insert Copy - вставляє нову модель, яка є копією поточної моделі, при цьому можна змінити її назву і розміщення.

Розглянемо створення бібліотечного файлу на прикладі керованого генератора.

Запустіть *VCO Library Editor*.

Створіть нову модель. На панелі інструментів натисніть кнопку New, введіть ім'я моделі. Перед Вами з'явиться інформаційна панель VCO. Поля, відмічені *, повинні бути обов'язково заповнені.

VCO	model001
Manufacturer	
Type	VCO
<input type="checkbox"/> Tuning Law	Datasheet Kv
Kv	*
V1	*
F1	*
V2	*
F2	*
Input Cap.	
<input type="checkbox"/> Phase Noise	Point / Floor
PN Floor	*
PN Level	*
at frequency	*
Flicker Corner	
Power	
Vcc	
Icc	

Рис. 29. Інформаційна панель VCO

Характеристику управління VCO можна задати двома способами. При виборі Table заповніть таблицю в полі Tuning Table. Кількість осередків можна регулювати за допомогою Tuning Table / Properties на головній панелі. У вікні Graphs буде побудована керуюча характеристика по табличних значень

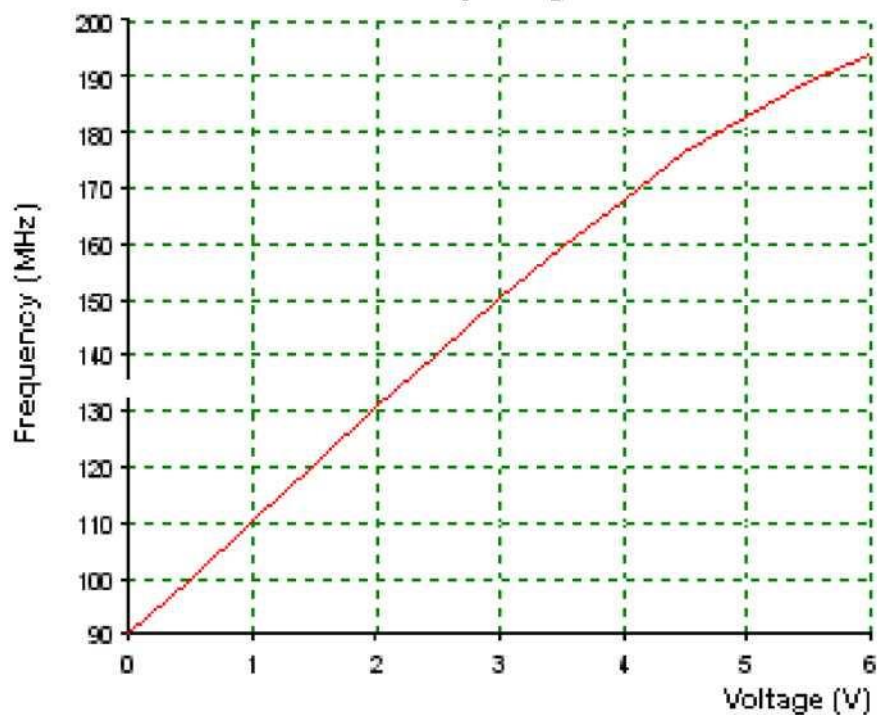


Рис. 30. керуюча характеристика VCO

Якщо ви хочете ввести свої значення щодо СП фазового шуму, то виберіть Table і заповніть таблицю Phase Noise Table. Властивості таблиці можна змінювати в Phase Noise / Properties. У вікні Graphs буде побудована СП по табличним значенням.

Збережіть модель в директорії lib / VCO. Ви можете ввести свою назву бібліотеки або зберегти у вже створену.

Додаток

Додаток 1 Синтезатор УКХ-діапазону

У розділі наводиться приклад використання програми ADISimPLL для розробки синтезатора частот УКХ-діапазону. Розглядається спрощений варіант синтезатора з ідеалізованими елементами. Ідеалізація стосується спрощення моделей фазового шуму опорного і перебудовується за частотою генераторів. Розглянуто одна з найпростіших систем наближення даної програми.

Завдання: розробити синтезатор частоти на основі мікросхеми ADF4154 з дробовим коефіцієнтом ділення, що працює в діапазоні 85-110 МГц з кроком сітки 100 кГц. Частоту ОГ прийняти рівною 18,9 МГц. Характеристику ПГ вважати ідеальною, крутизна ПГ 16.0 МГц / В. Потужність фазового шуму задати за рівнем білого шуму і значенням кутової частоти, використовуючи модель Лисона (Corner / Floor). Рівень побічних спектральних складових не повинен перевищувати -70 dBc. Використовуваний порядок фільтра - довільний. Рівень СПМ фазового шуму синтезованого сигналу визначаємо в діапазоні 100 Гц - 1 МГц. Порівняти спектр сигналу на виході синтезатора при токах витоку 40 нА і 0 нА.

При створенні синтезатора вибираємо необхідну мікросхему і вимога завдання кроку сітки. Задаємо діапазон частот і крок сітки. Вибираємо знаменник дробової частини дільника рівним 27. Так як режим швидкого захоплення частоти (Fast Lock) не використовуватиметься, ставимо перемикач Speedup Type в положення None. Напруга харчування залишаємо за замовчуванням. Вибираємо фільтр виду: ізодромного ланка і ФНЧ першого порядку. Задаємо необхідну крутизну ПГ і частоти ОГ. Запас стійкості по фазі і частоту зрізу системи залишаємо за замовчуванням.

У відкритому звіті змінюємо параметр Phase Noise в ОГ і ПГ з None на Corner / Floor. Інформаційна панель в розгорнутому стані представлена на рис. 31, 32.

System	
Min Freq	85.0MHz
Max Freq	110MHz
Channel Spc.	100.0kHz
PD Freq.	2.70MHz
Ref Divider	7
Ref Doubler	disabled
Modulus	27
Design Freq	96.7MHz
Reference	
Frequency	18.9MHz
Phase Noise	Corner / Floor
PN Floor	-155 dBc/Hz
Corner Freq.	1.00kHz
Flicker Corner	0Hz
VCO	
Tuning Law	Kv (ideal)
Kv	16.0MHz/V
f(V0)	97.5MHz
V0	2.50 V
Input Cap.	0F
Phase Noise	Corner / Floor
PN Floor	-155 dBc/Hz
Corner Freq.	1.00kHz
Flicker Corner	0Hz

Рис. 31. Інформаційна панель синтезатора

Chip	ADF4154	Loop Filter	CPP_3C
Mode	Normal	Specify:	Phase Margin
Main Divider		Loop Bandwidth	10.0kHz
Prescaler P	4	Phase Margin	45.0 deg
Min ctgs div.	31	Zero Loc.	3.57kHz
Counter Bits	Not Used	Pole Loc.	28.0kHz
Min value	31	Last Pole	100kHz
Max Freq.	4.00GHz	C1	105nF
Max PS Out Freq	500MHz	R1	31.3
Min Freq.	0Hz	C2	1.42uF
Ref Divider		R2	63.9
Counter Bits	4	C3	47.8nF
Min value	0.500	Lock Detect	None
Max Freq.	250MHz	FreqDomain	
Min Freq.	0Hz	Min Freq	100 Hz
Phase Detector	Charge Pump	Max Freq	1.00MHz
Rset	5.10k	Pts per Decade	10
CP Current	5.00mA	Analysis at	96.7MHz
Polarity	positive	Int (N)	35
Leakage	0A	Frac (F)	22
Vp	5.00 V	TimeDomain	
Vmin	0V	Type	Freq Change
Vmax	5.00 V	Start Frequency	85.0MHz
Max Freq.	32.0MHz	New Frequency	100MHz
Noise Mode	Dither OFF	Stop Time	1.12ms
PN Floor	-213 dBc/Hz	Max Time Step	18.5ns
Lock Detect	None		
Speedup Mode	None		

Рис. 32. Інформаційна панель синтезатора

На вкладках програми Components, FreqDomain, TimeDomain, Schematic, Report можна побачити характеристики використовуваних компонентів синтезатора, частотні залежності, перехідні характеристики, схему і звіт з чисельними характеристиками системи.

Перехідні процеси (TimeDomain)

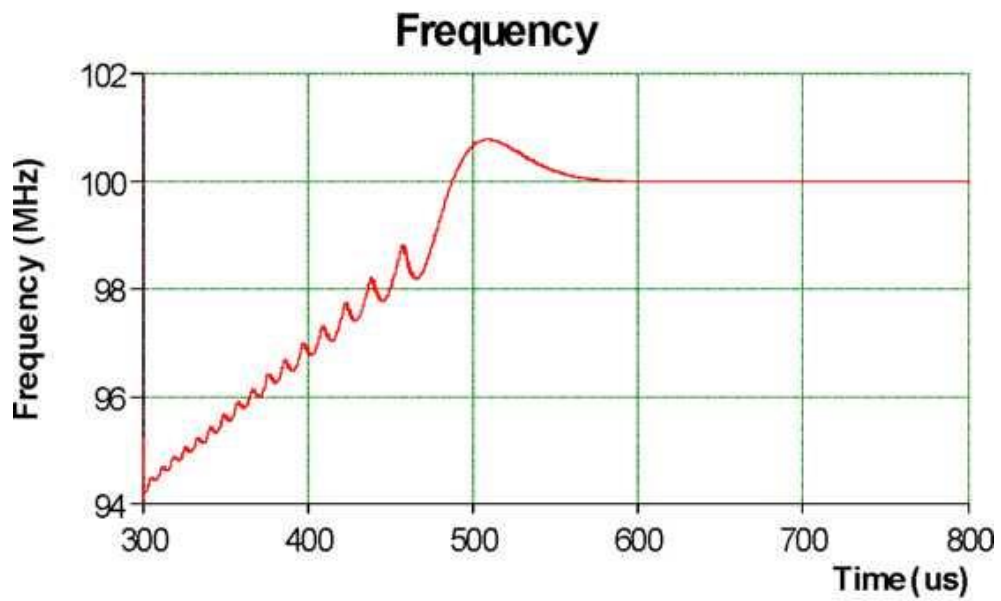


Рис. 33. Залежність вихідної частоти ПГ від часу

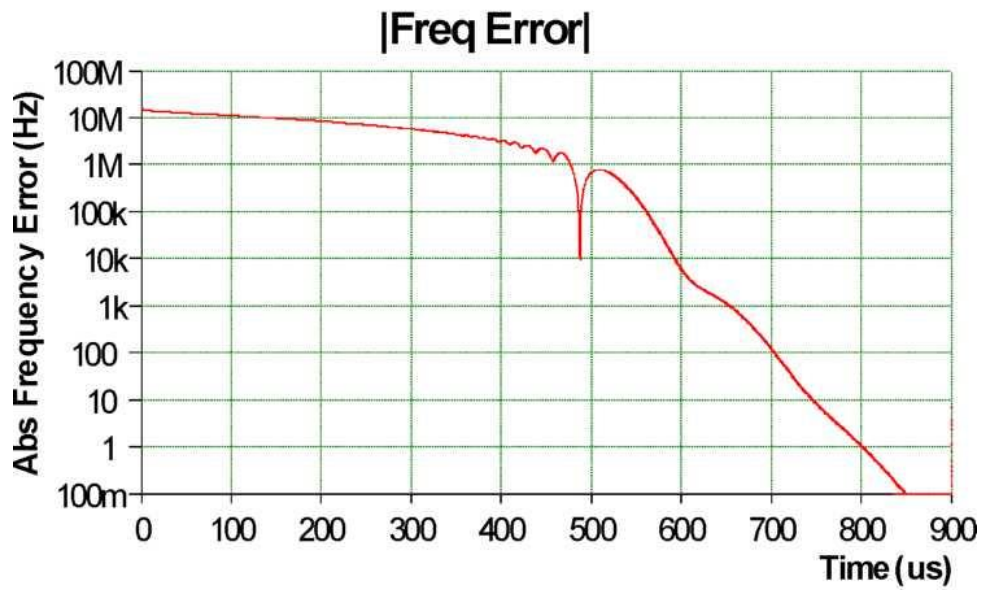


Рис. 34. Процес зміни абсолютної частотної помилки в часі

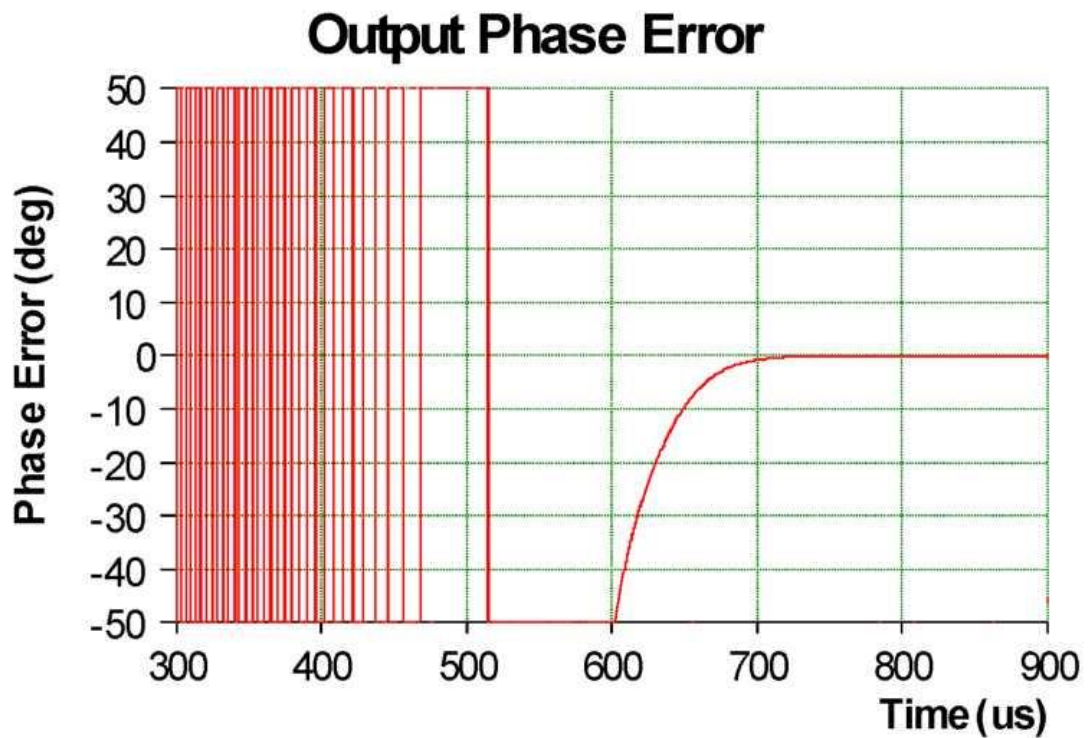


Рис. 35. Процес зміни фазового помилки в часі

Частотні залежності (**FreqDomain**)

СПМ фазового шуму спостерігаємо на частотах 100 Гц - 1 МГц.

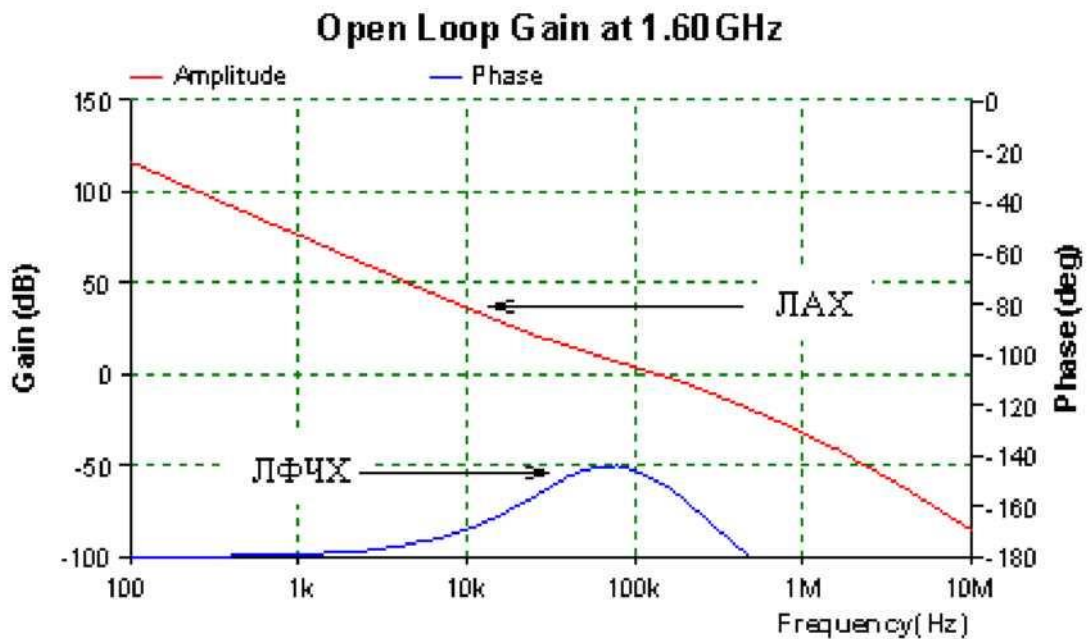


Рис. 36. Логарифмічні АЧХ і ФЧХ розімкнутого кільця ІФАПЧ



Рис. 37. Логарифмічні АЧХ і ФЧХ замкнутого кільця ІФАПЧ

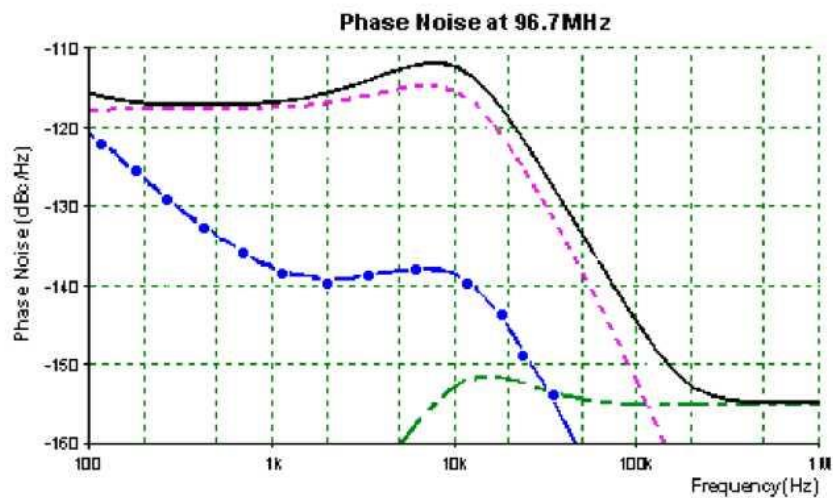


Рис. 38. Спектральна щільність потужності фазових флуктуацій сигналів (синтезованого сигнал (—), виходу ОГ (---), виходу ПГ (----) і виходу чіпа (---)) на частоті 96,7 МГц

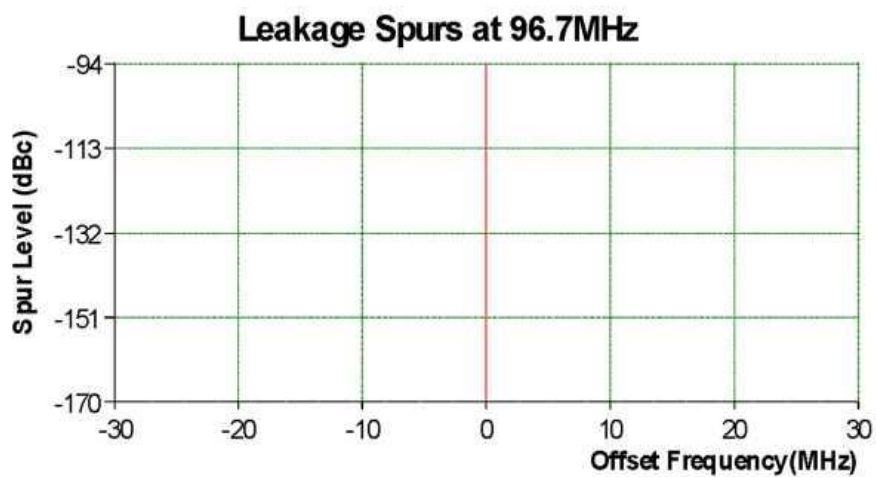


Рис. 39. Спектр сигналу на виході синтезатора при струмі витоку 0 нА

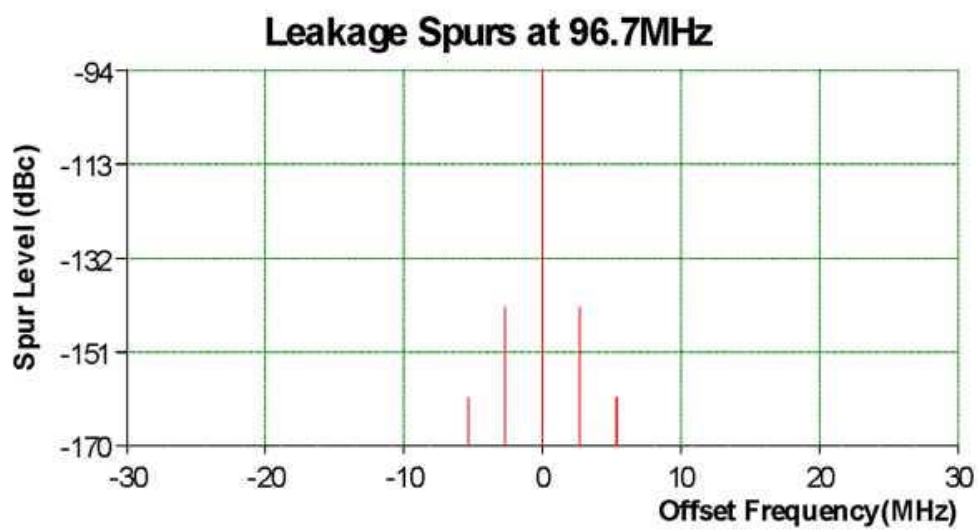


Рис. 40. Спектр сигналу на виході синтезатора при струмі витоку 40 нА

Характеристики компонентів синтезатора мають такий вигляд:

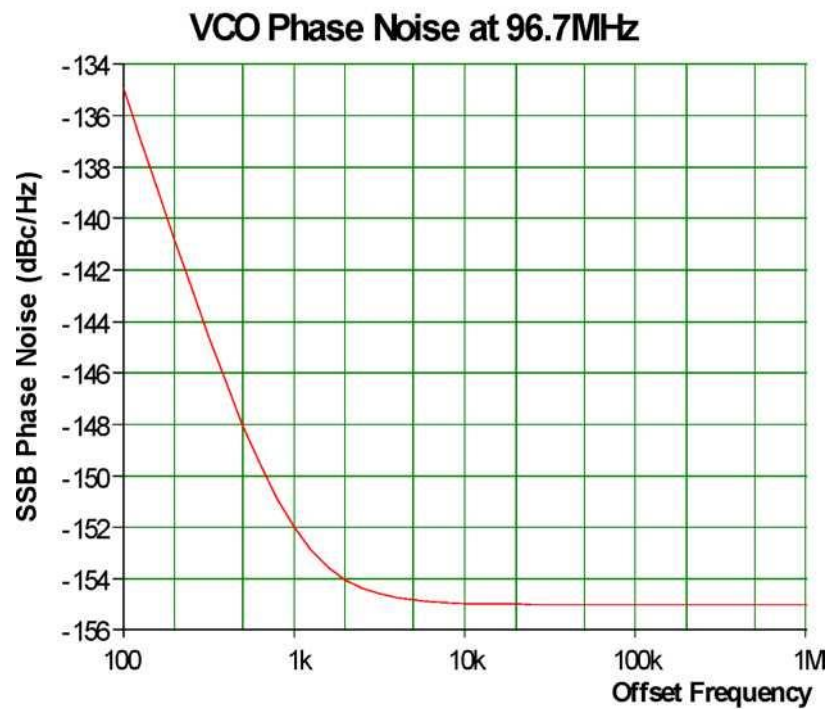


Рис. 41. Спектральна щільність потужності фазових флуктуацій сигналу з виходу ПГ на частоті 96,7 МГц

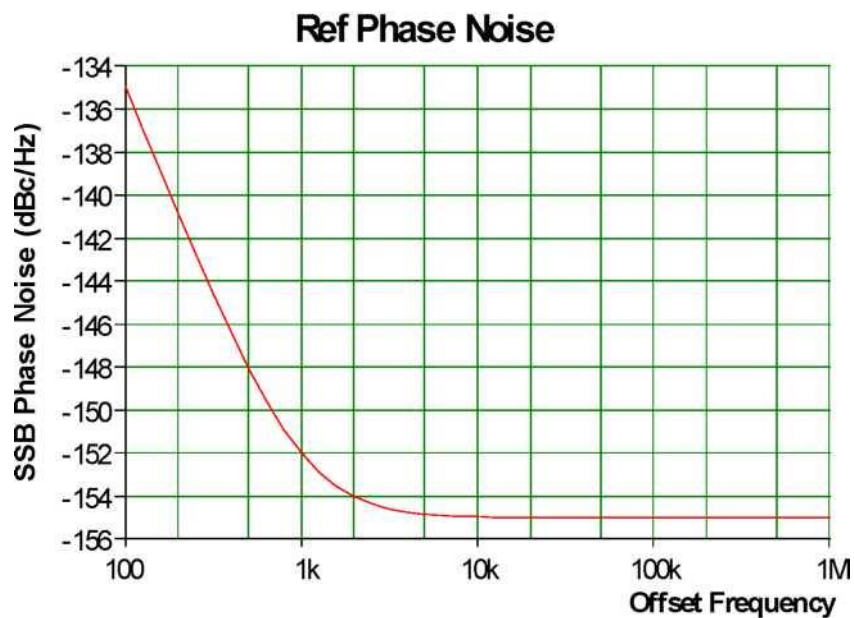


Рис. 42. Спектральна щільність потужності фазових флуктуацій сигналу з виходу ОГ на частоті 18,9 МГц

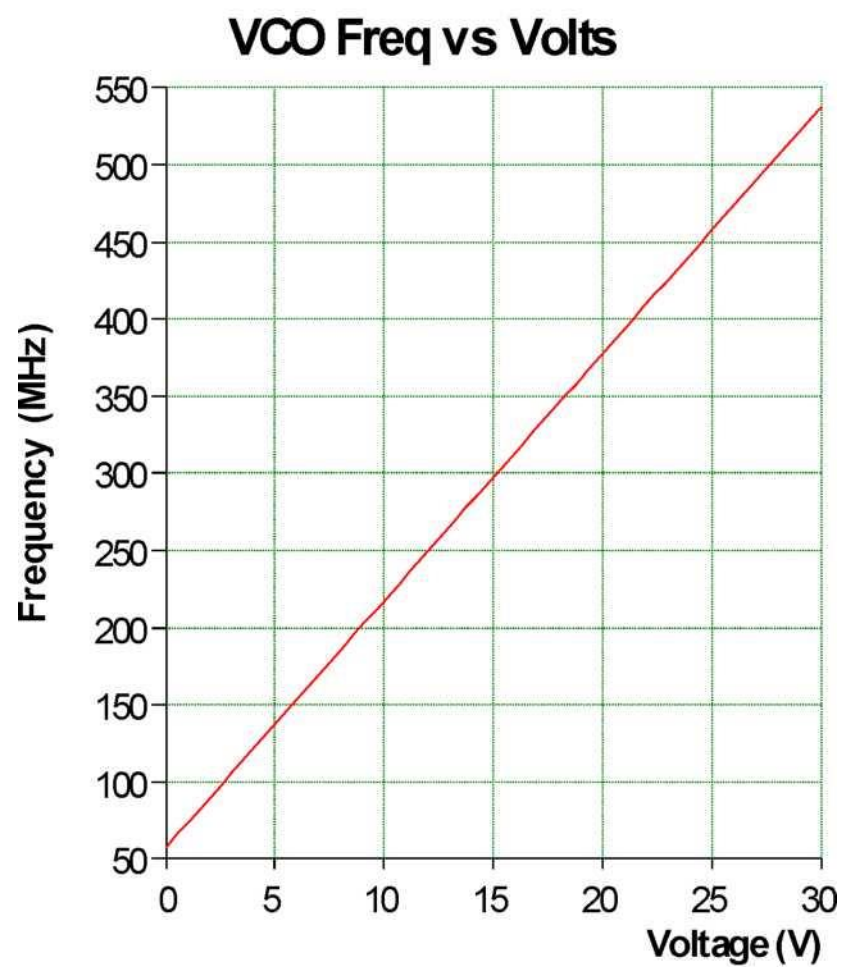


Рис. 43. Керуюча характеристика ПГ

Додаток 2 Синтезатор приймача

У цьому додатку при розробці синтезатора приймача враховуються фазові шуми опорного і перебудовується за частотою генераторів. Завдання параметрів і характеристик елементів схеми виконано на основі таблиць, складених з характеристик реальних елементів.

Завдання: розробити синтезатор частот на основі мікросхеми АЕР4154 з дробовим коефіцієнтом ділення, що працює в діапазоні 1600-1700 МГц з кроком сітки 100 кГц. В якості опорного генератора використовувати модуль P0X801BE-192 з частотою 19,2 МГц. Як перебудовується за частотою генератора використовувати модуль UC0190-165ТУ. Потужність фазового шуму задати з запропонованої таблиці.

Частота	Фаз.шум, dBc/Hz
100Гц	-118.7
1кГц	-118.87
10кГц	-130.66
100кГц	-136.8
1МГц	-129.9
10МГц	-137

Рівень побічних спектральних складових не повинен перевищувати -70 dBc. Використовуваний порядок фільтра - довільний. Рівень СПМ фазового шуму синтезованого сигналу визначаємо в діапазоні 100 Гц - 10 МГц. Порівняти спектр сигналу на виході синтезатора при токах витоку 40 нА і 0 нА.

При розробці синтезатора вибираємо необхідну мікросхему і вимога завдання кроку сітки. Задаємо діапазон частот і крок сітки. Вибираємо знаменник дробової частини дільника рівним 192. Так як режим швидкого захоплення частоти (**Fast Lock**) не використовуватиметься, ставимо перемикач **Speedup Type** в додатку **None**.

Напруга харчування залишаємо за замовчуванням.

Вибираємо фільтр виду: ізодромного ланка і ФНЧ першого порядку. Запас стійкості по фазі і частоту зрізу системи залишаємо за замовчуванням.

Інформаційна панель представлена на рис. 44.

System Min Freq 1.60GHz Max Freq 1.70GHz Channel Spc. 100.0kHz PD Freq. 19.2MHz Modulus 192 Design Freq 1.6492GHz		Loop Filter CPP_3C Specify: Components Loop Bandwidth 139kHz Phase Margin 29.9 deg Zero Loc. 37.3kHz Pole Loc. 160kHz Last Pole 1.94MHz C1 56.0pF R1 5.20k C2 820pF R2 2.70k C3 27.0pF	
Reference FOX801BE-192 Frequency 19.2MHz Phase Noise Table		Lock Detect None	
VCO VCO190-1650Ty Tuning Law Table Input Cap. 100pF Phase Noise Table		FreqDomain Min Freq 100 Hz Max Freq 10.0MHz Pts per Decade 10 Analysis at 1.60GHz	
Chip ADF4154 Mode Normal Main Divider Ref Divider Phase Detector Charge Pump Lock Detect None Speedup Mode None		TimeDomain Type Power On Frequency 1.60GHz Stop Time 45.7us Max Time Step 1.30ns	

Рис. 44. Інформаційна панель синтезатора

На вкладках програми Components, FreqDomain, TimeDomain, Schematic, Report можна побачити характеристики використовуваних компонентів синтезатора, частотні залежності, перехідні характеристики, схему і звіт з чисельними характеристиками системи.

Перехідні процеси (TimeDomain)

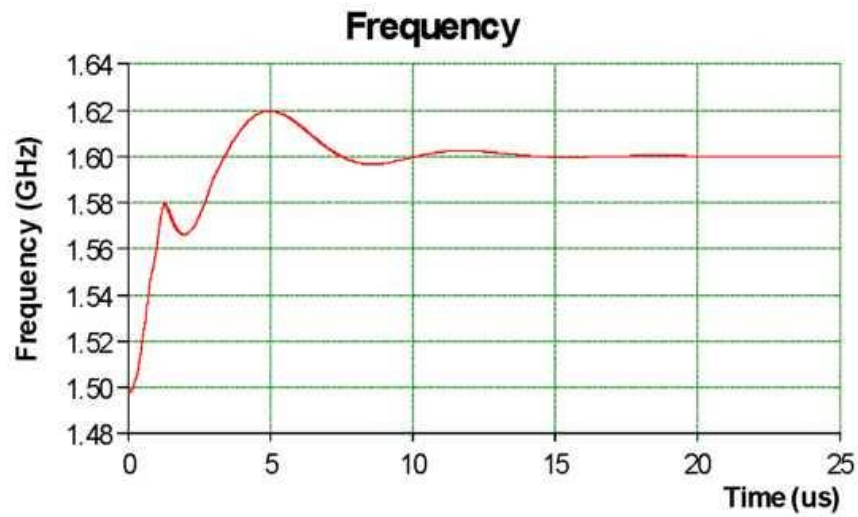


Рис. 45. Залежність вихідної частоти ПГ від часу

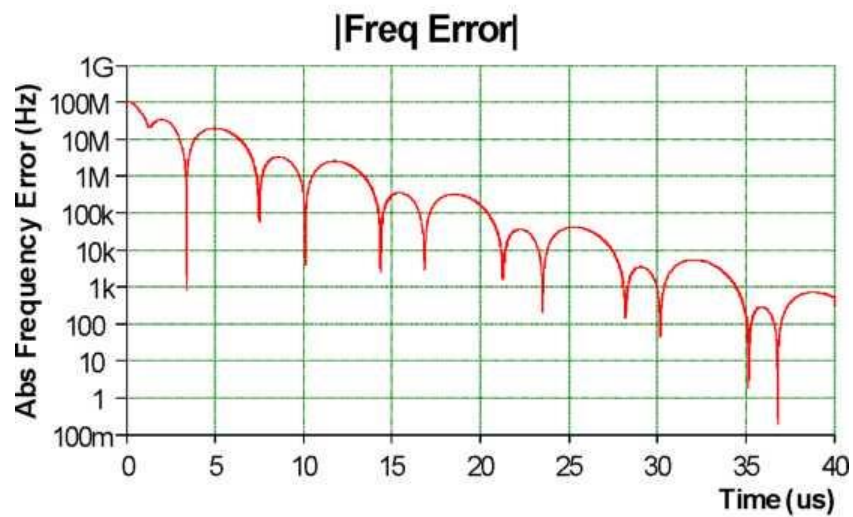


Рис. 46. Процес зміни абсолютної частотної помилки в часі

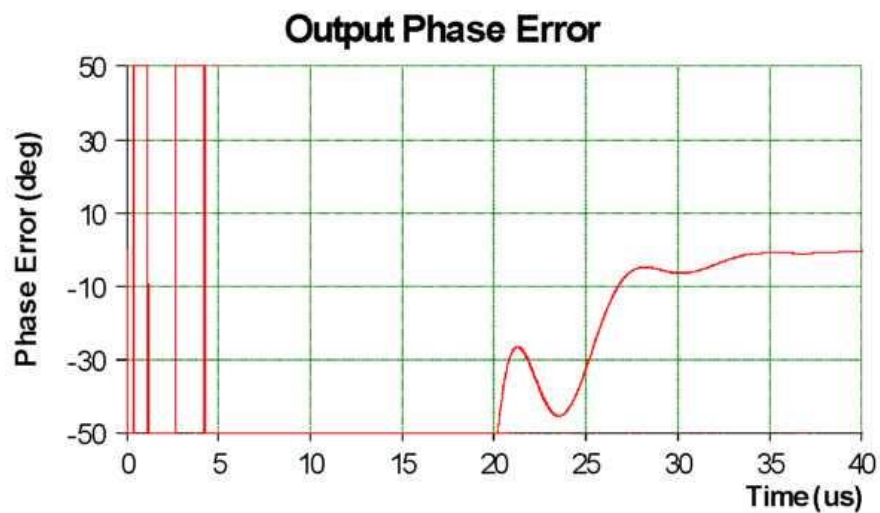


Рис. 47. Процес зміни фазового помилки в часі

Частотні залежності (**FreqDomain**)

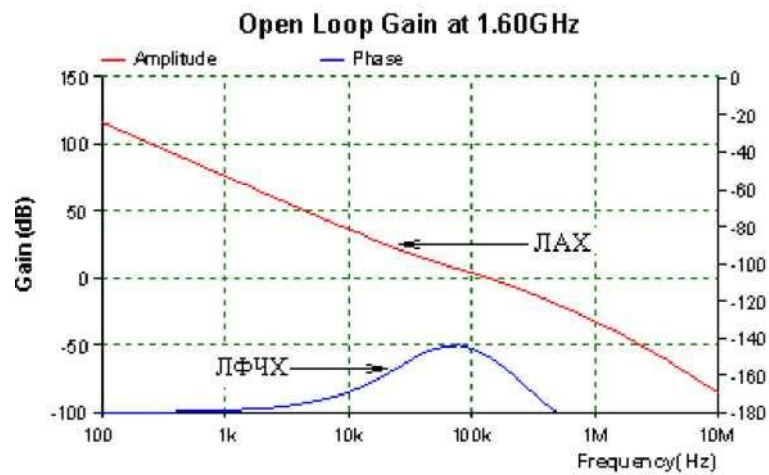


Рис. 48. ЛАХ і логарифмічна ФЧХ розімкнутого кільця ІФАПЧ

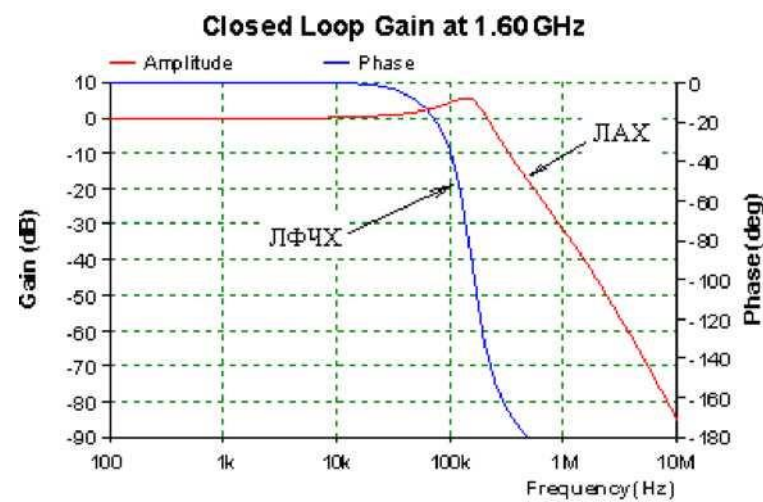


Рис. 49. Лах і логарифмічна ФЧХ замкнутого кільця ІФАПЧ

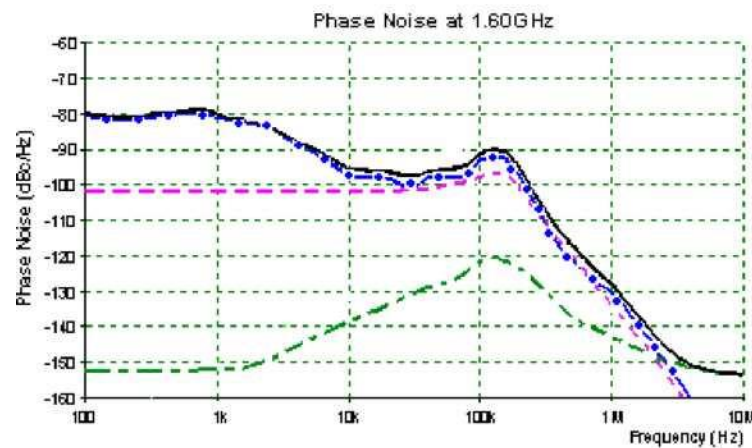


Рис. 50. Спектральна щільність потужності фазових флуктуацій сигналів (синтезованого сигналу (—), виходу ОГ (—), виходу ПГ (—) та виходу чіпу(—)) на частоті 1,6 ГГц

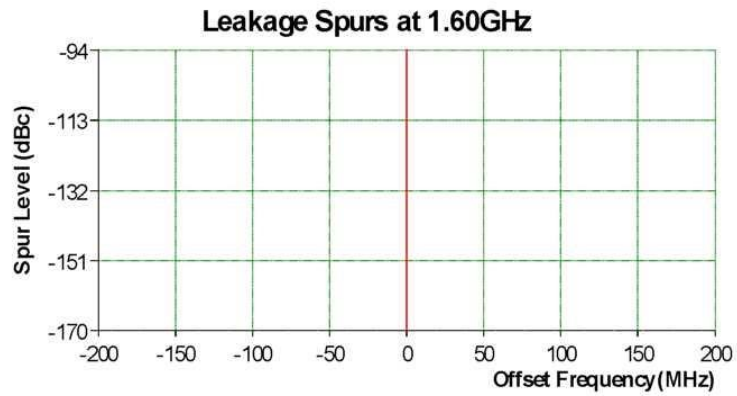


Рис. 51. Спектр сигналу на виході синтезатора при струмі витоку 0 нА

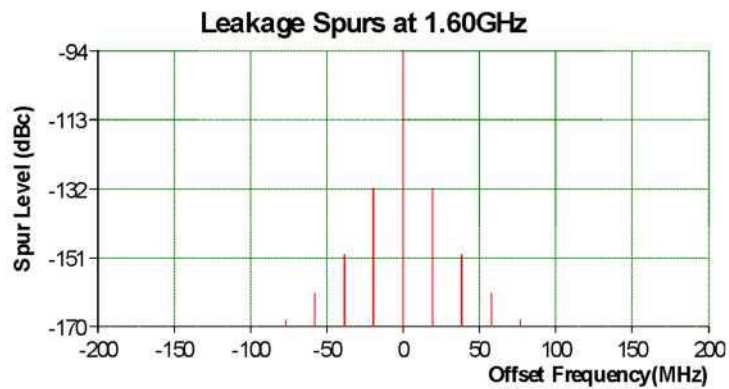


Рис. 52. Спектр сигналу на виході синтезатора при струмі витоку 40 нА

Характеристики компонентів синтезатора

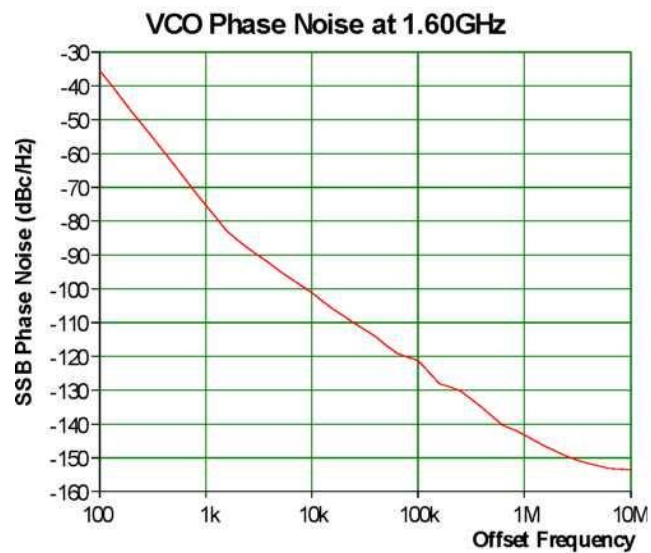


Рис. 53. Спектральна щільність потужності фазових флуктуацій сигналу з виходу ПГ на частоті 1,6 ГГц

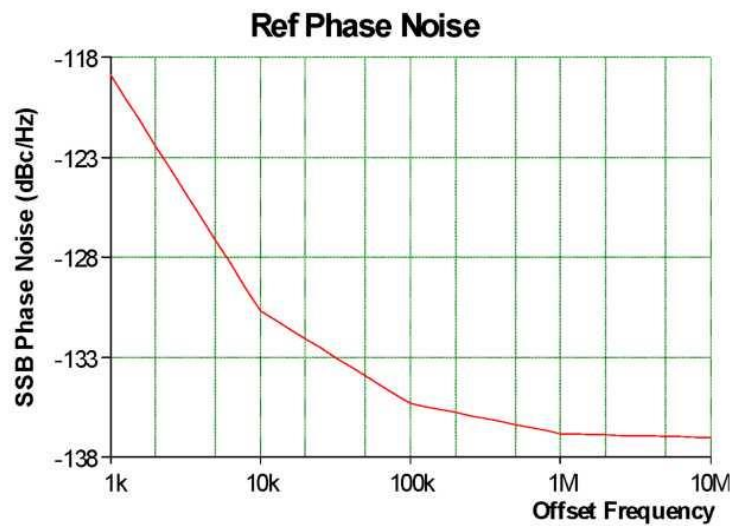


Рис. 54. Спектральна щільність потужності фазових флуктуацій сигналу з виходу ОГ на частоті 19,2 МГц

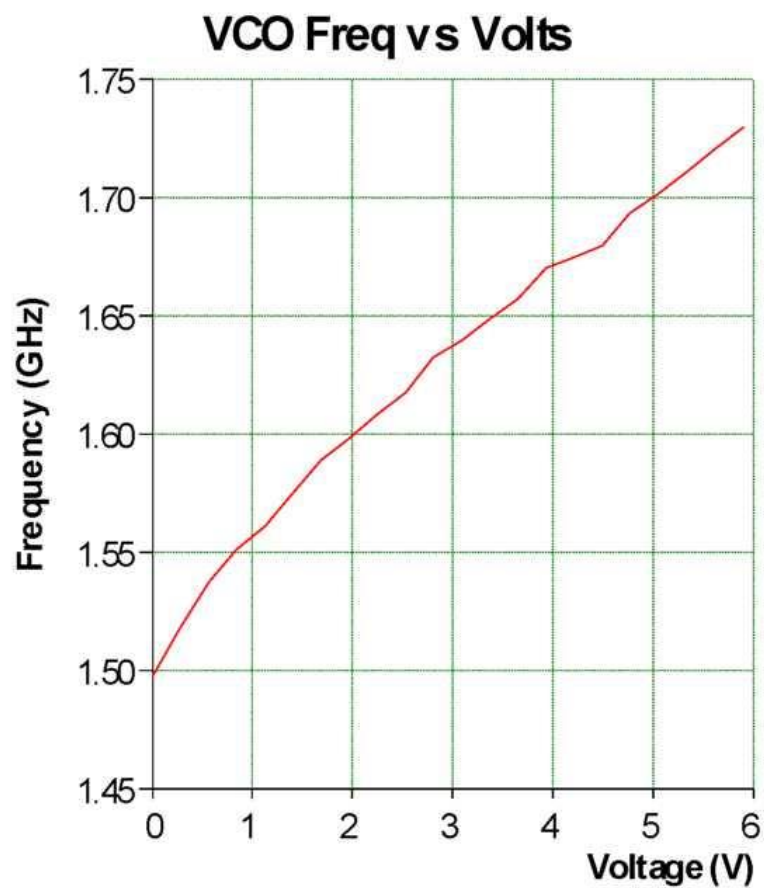


Рис. 55. Характеристика управління ПГ

Практичне заняття №7. Передпроектна оцінка передачі інформації по лінії далекого космічного зв'язку. Техніко-економічна оптимізація тракту НВЧ приймальної та передавальної земної станції супутникової лінії зв'язку

Задача №1

Ширина смуги частот радіотракта приймача центру ДКС становить Δf_T , мінімальна чутливість P_{PP} , а шумова температура всіх джерел шуму в приймачі $T_{\Sigma\Phi}$. Визначити час (в годинах і добах), необхідний для передачі з КА в центр ДКС цифрового фотознімку поверхні планети, розмір якого становить V .

№ Варіанту	Ширина смуги частот радіотракта приймача Δf_T , кГц	мінімальна чутливість P_{PP} , Вт	шумова температура всіх джерел шуму в приймачі $T_{\Sigma\Phi}$, К	Розмір цифрового фотознімку V , Мбайт
1	30	10^{-19}	40	6
2	35	$2 \cdot 10^{-19}$	50	6,5
3	40	$3 \cdot 10^{-19}$	65	5
4	45	$4 \cdot 10^{-19}$	75	5,5
5	50	$0,6 \cdot 10^{-19}$	80	5
6	25	$0,4 \cdot 10^{-19}$	90	6
7	20	$0,4 \cdot 10^{-19}$	100	4
8	15	$0,1 \cdot 10^{-19}$	120	7,5
9	30	$1,2 \cdot 10^{-19}$	135	7
10	35	$1,4 \cdot 10^{-19}$	125	6
11	40	$1,6 \cdot 10^{-19}$	110	6,5
12	45	$2,2 \cdot 10^{-19}$	90	4
13	50	$2,4 \cdot 10^{-19}$	85	4,5
14	25	$0,5 \cdot 10^{-19}$	70	5
15	20	$0,3 \cdot 10^{-19}$	60	5
16	30	$0,1 \cdot 10^{-19}$	135	6
17	50	$0,3 \cdot 10^{-19}$	125	6,5
18	50	$0,4 \cdot 10^{-19}$	120	5
19	45	$0,4 \cdot 10^{-19}$	110	5,5
20	45	$0,5 \cdot 10^{-19}$	100	5
21	40	$0,6 \cdot 10^{-19}$	90	6
22	40	$1,2 \cdot 10^{-19}$	90	4
23	35	$1,4 \cdot 10^{-19}$	85	7,5
24	35	$1,6 \cdot 10^{-19}$	80	7
25	30	$1 \cdot 10^{-19}$	75	6
26	25	$2,2 \cdot 10^{-19}$	70	6,5
27	25	$2,4 \cdot 10^{-19}$	65	4

28	20	$2 \cdot 10^{-19}$	60	4,5
29	20	$3 \cdot 10^{-19}$	50	5
30	15	$4 \cdot 10^{-19}$	40	5
31	15	$0,1 \cdot 10^{-19}$	120	7,5
32	50	$2,4 \cdot 10^{-19}$	85	4,5
33	45	$2,2 \cdot 10^{-19}$	90	4
34	40	$1,6 \cdot 10^{-19}$	110	6,5
35	35	$1,4 \cdot 10^{-19}$	125	6
36	30	$1,2 \cdot 10^{-19}$	135	7
37	25	$0,5 \cdot 10^{-19}$	70	5
38	20	$0,3 \cdot 10^{-19}$	60	5

Задача №2

Визначити мінімальний діаметр (в метрах) і коефіцієнт посилення (в децибелах) дзеркальної параболічної антени (ЗА) центру ДКС, що забезпечує прийом сигналу від КА на частоті f з чутливістю не гірше $P_{пр}$ (Вт) при знаходженні КА на дальності d (млн.км) від Землі, якщо коефіцієнт посилення антени передавача КА становить $G_{пд}$ (дБ), а його потужність $P_{пд}$ (Вт). Коефіцієнт використання поверхні ЗА центру ДКС прийняти рівним v . Втрати, зумовлені впливом іоносфери, тропосфери і. ін. чинників прийняти рівними L (дБ)

№ Варіанту	Несуча частота сигналу f , ГГц	Чутливість приймача земної станції $P_{пр}$, Вт	Дальність до космічного апарата від земної станції d , млн.км	Коефіцієнт підсилення антени КА, дБ	Потужність передавача КА, Вт	Коефіцієнт використання поверхні ЗА, v	Втрати від іоносфери, тропосфери і.т.п L , дБ
1	2	10^{-21}	500	10	40	0,65	8
2	1,9	$2 \cdot 10^{-21}$	450	15	20	0,7	9
3	1,8	$3 \cdot 10^{-21}$	400	18	10	0,7	10
4	1,7	$4 \cdot 10^{-21}$	350	20	5	0,65	7
5	1,6	$5 \cdot 10^{-21}$	300	18	40	0,6	6,5
6	1,5	$6 \cdot 10^{-21}$	500	15	20	0,65	7
7	1,4	$7 \cdot 10^{-21}$	550	10	10	0,55	6
8	1,3	$8 \cdot 10^{-21}$	600	25	5	0,55	6
9	1,2	$9 \cdot 10^{-21}$	450	20	40	0,7	8
10	1,1	$10 \cdot 10^{-21}$	400	15	20	0,55	8,5
11	1	$20 \cdot 10^{-21}$	350	12	10	0,7	9
12	2,1	$40 \cdot 10^{-21}$	300	8	5	0,7	9,5
13	2,2	$60 \cdot 10^{-21}$	550	16	50	0,6	10
14	2,3	$80 \cdot 10^{-21}$	500	16	25	0,65	10
15	2,4	$100 \cdot 10^{-21}$	450	19	30	0,55	8,5

16	2	$9 \cdot 10^{-21}$	500	10	40	0,65	8
17	1	$20 \cdot 10^{-21}$	350	12	10	0,6	9
18	1,1	$3 \cdot 10^{-21}$	400	15	20	0,6	8,5
19	1,2	$4 \cdot 10^{-21}$	450	20	40	0,65	8
20	1,3	$40 \cdot 10^{-21}$	600	25	5	0,65	6
21	1,4	$5 \cdot 10^{-21}$	550	10	10	0,65	6
22	1,5	$6 \cdot 10^{-21}$	500	15	20	0,7	7
23	1,6	$60 \cdot 10^{-21}$	300	18	40	0,7	6,5
24	1,7	$7 \cdot 10^{-21}$	350	20	5	0,7	7
25	1,8	$8 \cdot 10^{-21}$	400	18	10	0,7	10
26	1,9	$80 \cdot 10^{-21}$	450	15	20	0,7	9
27	2,1	$2 \cdot 10^{-21}$	300	8	5	0,55	9,5
28	2,2	$2 \cdot 10^{-21}$	550	16	50	0,55	10
29	2,3	$100 \cdot 10^{-21}$	500	16	25	0,55	10
30	2,4	$10 \cdot 10^{-21}$	450	19	30	0,55	8,5
31	2,1	$40 \cdot 10^{-21}$	300	8	5	0,7	9,5
32	1	$60 \cdot 10^{-21}$	550	10	50	0,6	10
33	1,1	$80 \cdot 10^{-21}$	500	12	25	0,65	10
34	1,2	$100 \cdot 10^{-21}$	450	15	30	0,55	9
35	2	$9 \cdot 10^{-21}$	500	16	40	0,65	8,5
36	2,2	$20 \cdot 10^{-21}$	350	16	10	0,6	8,5
37	2,3	$3 \cdot 10^{-21}$	400	19	20	0,6	8
38	2,4	$4 \cdot 10^{-21}$	450	20	40	0,65	8

Задача №3

Дано функціонально вартісні моделі компонентів передавальної ЗС:

- антени в складі дзеркала і опромінювача C_a тис. дол.,
- передавача Ку - діапазону $C_{пд}$ тис. дол.,

Отримати функціональну залежність оптимального діаметра антени D_a від: ЕІВП ЗС Е, довжини хвилі λ і КВП.

Для заданих значень λ , Е, КВП = 0.9 визначити:

- розмір оптимального діаметра антени D_a ,
- потужність передавача Р,
- вартість передавальної системи СΣ.

№ п/п	вартісні моделі компонентів передавальної ЗС		Довжина хвилі λ , см	ЕІВП Е, дБВт,	КВП
	антени в складі дзеркала і опромінювача C_a тис. дол.	передавача Ку - діапазону $C_{пд}$ тис. дол.,			
1	$C_a = -9,907 + 3,754 \cdot D_a^{1,5}$	$C_{пд} = 7.059 \cdot P^{0,43}$	2,5	75	0.9
2	$C_a = 1,988 + 1,076 \cdot D_a^2$	$C_{пд} = 4.456 \cdot P^{0,43}$	7,5	70	0.9
3	$C_a = 4,234 + 2,433 \cdot D_a^{1,4}$	$C_{пд} = 3,412 \cdot P^{0,73}$	2,5	67	0.8

4	$C_a = -7,896 + 1,321 \cdot D_a^{2,4}$	$C_{\Pi\Delta} = 1.655 \cdot P^{0,87}$	7,5	71	0.85
5	$C_a = 2,456 + 6,432 \cdot D_a^{1,8}$	$C_{\Pi\Delta} = 5.344 \cdot P^{0,9}$	2,5	72	0.8
6	$C_a = -8,612 + 5,094 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\Pi\Delta} = 3.786 \cdot P^{0,52}$	7,5	75	0.75
7	$C_a = -4,111 + 7,564 \cdot D_a^{1,9}$	$C_{\Pi\Delta} = 2.198 \cdot P^{1,32}$	2,5	70	0.7
8	$C_a = 2,891 + 1,061 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\Pi\Delta} = 7.123 \cdot P^{0,33}$	7,5	60	0.8
9	$C_a = 2,321 + 1,735 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{\Pi\Delta} = 5.897 \cdot P^{1,06}$	2,5	65	0.9
10	$C_a = 1,889 + 8,297 \cdot D_a^{2,1}$	$C_{\Pi\Delta} = 7,567 \cdot P^{0,58}$	7,5	70	0.7
11	$C_a = 2,321 + 1,735 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{\Pi\Delta} = 5.897 \cdot P^{1,06}$	2,5	75	0.9
12	$C_a = 2,891 + 1,061 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\Pi\Delta} = 7.123 \cdot P^{0,33}$	7,5	70	0.9
13	$C_a = -4,111 + 7,564 \cdot D_a^{1,9}$	$C_{\Pi\Delta} = 2.198 \cdot P^{1,32}$	2,5	67	0.8
14	$C_a = -8,612 + 5,094 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\Pi\Delta} = 3.786 \cdot P^{0,52}$	7,5	71	0.85
15	$C_a = 2,456 + 6,432 \cdot D_a^{1,8}$	$C_{\Pi\Delta} = 5.344 \cdot P^{0,9}$	2,5	72	0.8
16	$C_a = -7,896 + 1,321 \cdot D_a^{2,4}$	$C_{\Pi\Delta} = 1.655 \cdot P^{0,87}$	7,5	75	0.75
17	$C_a = 4,234 + 2,433 \cdot D_a^{1,4}$	$C_{\Pi\Delta} = 3,412 \cdot P^{0,73}$	2,5	70	0.7
18	$C_a = 1,988 + 1,076 \cdot D_a^2$	$C_{\Pi\Delta} = 4.456 \cdot P^{0,43}$	7,5	60	0.8
19	$C_a = -9,907 + 3,754 \cdot D_a^{1,5}$	$C_{\Pi\Delta} = 7.059 \cdot P^{0,43}$	2,5	65	0.9
20	$C_a = -9,907 + 3,754 \cdot D_a^{1,5}$	$C_{\Pi\Delta} = 7.059 \cdot P^{0,43}$	2,5	75	0.9
21	$C_a = 1,988 + 1,076 \cdot D_a^2$	$C_{\Pi\Delta} = 4.456 \cdot P^{0,43}$	7,5	70	0.9
22	$C_a = 4,234 + 2,433 \cdot D_a^{1,4}$	$C_{\Pi\Delta} = 3,412 \cdot P^{0,73}$	2,5	67	0.8
23	$C_a = -7,896 + 1,321 \cdot D_a^{2,4}$	$C_{\Pi\Delta} = 1.655 \cdot P^{0,87}$	7,5	71	0.85
24	$C_a = 2,456 + 6,432 \cdot D_a^{1,8}$	$C_{\Pi\Delta} = 5.344 \cdot P^{0,9}$	2,5	72	0.8
25	$C_a = -8,612 + 5,094 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\Pi\Delta} = 3.786 \cdot P^{0,52}$	7,5	75	0.75
26	$C_a = -4,111 + 7,564 \cdot D_a^{1,9}$	$C_{\Pi\Delta} = 2.198 \cdot P^{1,32}$	2,5	70	0.7
27	$C_a = 2,891 + 1,061 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\Pi\Delta} = 7.123 \cdot P^{0,33}$	7,5	60	0.8
28	$C_a = 2,321 + 1,735 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{\Pi\Delta} = 5.897 \cdot P^{1,06}$	2,5	65	0.9
29	$C_a = 1,889 + 8,297 \cdot D_a^{2,1}$	$C_{\Pi\Delta} = 7,567 \cdot P^{0,58}$	7,5	70	0.7
30	$C_a = 2,321 + 1,735 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{\Pi\Delta} = 5.897 \cdot P^{1,06}$	2,5	75	0.9
31	$C_a = 2,891 + 1,061 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\Pi\Delta} = 7.123 \cdot P^{0,33}$	7,5	70	0.9
32	$C_a = -4,111 + 7,564 \cdot D_a^{1,9}$	$C_{\Pi\Delta} = 2.198 \cdot P^{1,32}$	2,5	67	0.8
33	$C_a = -8,612 + 5,094 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\Pi\Delta} = 3.786 \cdot P^{0,52}$	7,5	71	0.85
34	$C_a = 2,456 + 6,432 \cdot D_a^{1,8}$	$C_{\Pi\Delta} = 5.344 \cdot P^{0,9}$	2,5	72	0.8
35	$C_a = -7,896 + 1,321 \cdot D_a^{2,4}$	$C_{\Pi\Delta} = 1.655 \cdot P^{0,87}$	7,5	75	0.75
36	$C_a = 4,234 + 2,433 \cdot D_a^{1,4}$	$C_{\Pi\Delta} = 3,412 \cdot P^{0,73}$	2,5	70	0.7
37	$C_a = 1,988 + 1,076 \cdot D_a^2$	$C_{\Pi\Delta} = 4.456 \cdot P^{0,43}$	7,5	60	0.8
38	$C_a = -9,907 + 3,754 \cdot D_a^{1,5}$	$C_{\Pi\Delta} = 7.059 \cdot P^{0,43}$	2,5	65	0.9

Задача №4

Дано функціонально вартісні моделі компонентів приймальної ЗС:

- антени в складі дзеркала і опромінювача C_a тис. дол.,
- приймача Ку – діапазону $C_{\text{пр}}$ тис. дол.,

Отримати функціональну залежність оптимального діаметра антени від: добротності ЗС Q , довжини хвилі λ і КВП.

Для значень $\lambda = 2,5$ см, $Q = 40$ дБ / К, КВП = 0.9 визначити:

- розмір оптимального діаметра антени D_a ,
- еквівалентну шумову температуру приймальної ЗС,
- вартість прийомної системи C_{Σ} .

№ п/п	вартісні моделі компонентів передавальної ЗС		Довжина хвилі λ , см	Добротність ЗС Q , дБ/К	КВП
	антени в складі дзеркала і опромінювача C_a тис. дол.	передавача Ку - діапазону $C_{\text{пр}}$ тис. дол.,			
1	$C_a = -9,907 + 3,754 \cdot D_a^{1,5}$	$C_{\text{пр}} = 124.795 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,15}$	2,5	40	0.9
2	$C_a = 1,988 + 1,076 \cdot D_a^2$	$C_{\text{пр}} = 506.731 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,5}$	7,5	35	0.9
3	$C_a = 4,234 + 8,233 \cdot D_a^{1,2}$	$C_{\text{пр}} = 400.212 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,73}$	2,5	42	0.8
4	$C_a = -8,896 + 3,321 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{\text{пр}} = 474.052 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,17}$	7,5	41	0.85
5	$C_a = 2,456 + 6,432 \cdot D_a^{1,2}$	$C_{\text{пр}} = 315.348 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,9}$	2,5	39	0.8
6	$C_a = -8,612 + 5,094 \cdot D_a^{1,15}$	$C_{\text{пр}} = 323.612 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,22}$	7,5	37	0.75
7	$C_a = -4,111 + 7,564 \cdot D_a^{1,4}$	$C_{\text{пр}} = 211.238 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,2}$	2,5	38	0.7
8	$C_a = 2,891 + 1,061 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\text{пр}} = 152.623 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,33}$	7,5	36	0.8
9	$C_a = 2,321 + 1,735 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{\text{пр}} = 512.497 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,36}$	2,5	37	0.9
10	$C_a = 1,889 + 5,297 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\text{пр}} = 936.567 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,18}$	7,5	35	0.8
11	$C_a = 2,321 + 1,735 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{\text{пр}} = 512.497 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,36}$	2,5	40	0.9
12	$C_a = 2,891 + 1,061 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{\text{пр}} = 152.623 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,33}$	7,5	35	0.9
13	$C_a = -4,111 + 7,564 \cdot D_a^{1,4}$	$C_{\text{пр}} = 211.238 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,2}$	2,5	42	0.8
14	$C_a = -8,612 + 5,094 \cdot D_a^{1,15}$	$C_{\text{пр}} = 323.612 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,22}$	7,5	41	0.85
15	$C_a = 2,456 + 6,432 \cdot D_a^{1,2}$	$C_{\text{пр}} = 315.348 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,9}$	2,5	39	0.8
16	$C_a = -8,896 + 3,321 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{\text{пр}} = 474.052 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,17}$	7,5	37	0.75
17	$C_a = 4,234 + 8,233 \cdot D_a^{1,2}$	$C_{\text{пр}} = 400.212 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,73}$	2,5	38	0.7
18	$C_a = 1,988 + 1,076 \cdot D_a^2$	$C_{\text{пр}} = 506.731 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,5}$	7,5	36	0.8
19	$C_a = -9,907 + 3,754 \cdot D_a^{1,5}$	$C_{\text{пр}} = 124.795 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,15}$	2,5	37	0.9
20	$C_a = -9,907 + 3,754 \cdot D_a^{1,5}$	$C_{\text{пр}} = 124.795 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,15}$	2,5	40	0.9
21	$C_a = 1,988 + 1,076 \cdot D_a^2$	$C_{\text{пр}} = 506.731 \cdot T_{\text{ш}}^{-1,5}$	7,5	35	0.9

22	$C_a = 4,234 + 8,233 \cdot D_a^{1,2}$	$C_{PP} = 400.212 \cdot T_{III}^{-1,73}$	2,5	42	0.8
23	$C_a = -8,896 + 3,321 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{PP} = 474.052 \cdot T_{III}^{-1,17}$	7,5	41	0.85
24	$C_a = 2,456 + 6,432 \cdot D_a^{1,2}$	$C_{PP} = 315.348 \cdot T_{III}^{-1,9}$	2,5	39	0.8
25	$C_a = -8,612 + 5,094 \cdot D_a^{1,15}$	$C_{PP} = 323.612 \cdot T_{III}^{-1,22}$	7,5	37	0.75
26	$C_a = -4,111 + 7,564 \cdot D_a^{1,4}$	$C_{PP} = 211.238 \cdot T_{III}^{-1,2}$	2,5	38	0.7
27	$C_a = 2,891 + 1,061 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{PP} = 152.623 \cdot T_{III}^{-1,33}$	7,5	36	0.8
28	$C_a = 2,321 + 1,735 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{PP} = 512,497 \cdot T_{III}^{-1,36}$	2,5	37	0.9
29	$C_a = 1,889 + 5,297 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{PP} = 936.567 \cdot T_{III}^{-1,18}$	7,5	35	0.8
30	$C_a = 2,321 + 1,735 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{PP} = 512,497 \cdot T_{III}^{-1,36}$	2,5	40	0.9
31	$C_a = 2,891 + 1,061 \cdot D_a^{1,6}$	$C_{PP} = 152.623 \cdot T_{III}^{-1,33}$	7,5	35	0.9
32	$C_a = -4,111 + 7,564 \cdot D_a^{1,4}$	$C_{PP} = 211.238 \cdot T_{III}^{-1,2}$	2,5	42	0.8
33	$C_a = -8,612 + 5,094 \cdot D_a^{1,15}$	$C_{PP} = 323.612 \cdot T_{III}^{-1,22}$	7,5	41	0.85
34	$C_a = 2,456 + 6,432 \cdot D_a^{1,2}$	$C_{PP} = 315.348 \cdot T_{III}^{-1,9}$	2,5	39	0.8
35	$C_a = -8,896 + 3,321 \cdot D_a^{1,7}$	$C_{PP} = 474.052 \cdot T_{III}^{-1,17}$	7,5	37	0.75
36	$C_a = 4,234 + 8,233 \cdot D_a^{1,2}$	$C_{PP} = 400.212 \cdot T_{III}^{-1,73}$	2,5	38	0.7
37	$C_a = 1,988 + 1,076 \cdot D_a^2$	$C_{PP} = 506.731 \cdot T_{III}^{-1,5}$	7,5	36	0.8
38	$C_a = -9,907 + 3,754 \cdot D_a^{1,5}$	$C_{PP} = 124.795 \cdot T_{III}^{-1,15}$	2,5	37	0.9

Розподіл варіантів завдання

Вказується викладачем окремо

1. Особливості систем далекого космічного зв'язку

Радіохвилі різних діапазонів по-різному проходять через земну атмосферу. Для космічного зв'язку оптимальний діапазон від **1,5 до 30 сантиметрів**. За межами цього вікна радіосигнал помітно послаблюється в атмосфері або навіть може від неї відбитися. **На більш коротких хвилях втрати енергії зростають за рахунок поглинання молекулами води і кисню в тропосфері, а на більш довгих хвилях проходженню сигналу все сильніше заважає іоносфера, яка для хвиль довше 10-30 метрів стає непереборною перешкодою.** Поглинання радіохвиль також викликається дощем і туманом, але, звичайно, не в такій мірі, як в оптичному діапазоні.

Електромагнітні хвилі, за допомогою яких радіосигнал передається в космічному просторі, рухаються з величезною швидкістю - швидкістю світла. На Землі затримки в передачі майже не відчуються, а от з космонавтами на орбіті доводиться говорити вже з затримкою. **Відповідь з Місяця буде йти півтори секунди, з Марса - вже хвилин шість.** Крім того, у міру віддалення передавача сигнал стрімко згасає. **Як же бути? Проблема важка, але вирішувана.**

1.1 Космічний апарат «Вояджер-1»

Сьогодні найвіддаленіший космічний об'єкт, з яким підтримується радіоконтакт — це американська автоматична міжпланетна станція «Вояджер-1», запущена **5 вересня 1977** (рис.1.1).

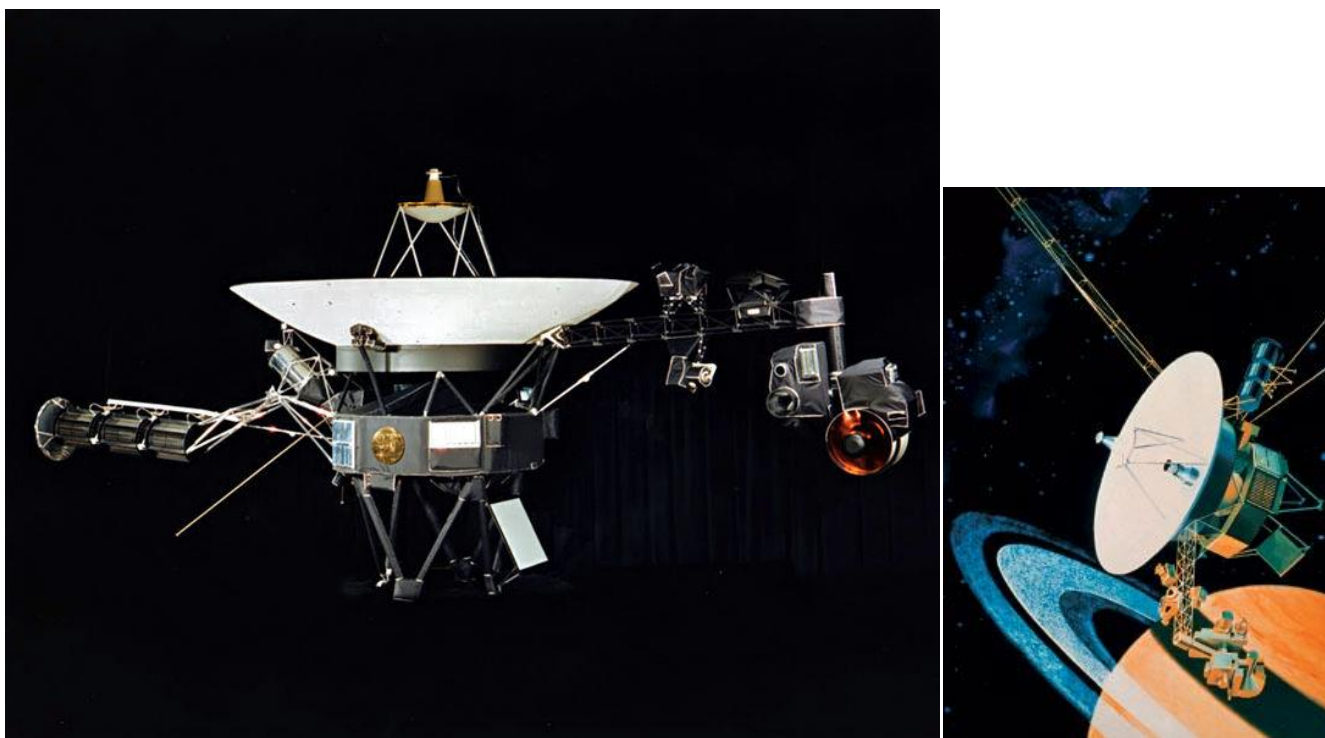


Рис.1.1 Автоматична міжпланетна станція «Вояджер-1»

В даний час **знаходиться в робочому стані і виконує додаткову місію з визначення місцезнаходження кордонів сонячної системи**, включаючи пояс Койпера (область Сонячної системи за орбітою Нептуна (**30 а. Е. Від Сонця**) приблизно до відстані **55 а. Е.**). **Первісна місія полягала в дослід-вання Юпітера і Сатурна.** «Вояджер-1» був першим зондом, який зробив детальні знімки супутників цих планет. **На борту апарата закріплена золота пластина**, де для інопланетян вказано місцезнаходження Землі, а також записані ряд зображень і звуків.

«Вояджер-1» - найдальший від Землі і найшвидший рухомий об'єкт, створений людиною. Поточна швидкість «Вояджера-1» дорівнює **17 км / с.** Поряд з «Вояджером-1», міжзоряними дослідженнями займається «Вояджер-2», а в майбутньому - і «Нові горизонти».

28 серпня 2009 року «Вояджер-1» був приблизно в **110,94 а. е.** (16,596 млрд км) від Сонця і досяг **межі ударної хвилі** (регіон між Сонячної Системою і

міжзоряним речовиною, в якому вплив Сонця поступається впливу інших тіл галактики).

Остання мета «Вояджера-1» - досягти **геліопаузою** (рис.1.2), яка є кордоном нашої Сонячної Системи. Якщо «Вояджер-1» все ще буде функціонувати при досягненні **геліопаузою**, то він стане першим зондом, який передав інформацію про умови, які панують в міжзоряному середовищі. З такої відстані сигнали «Вояджера-1» йтимуть **більше 14 годин** до центру управління «Лабораторії реактивного руху» (об'єднаний проект NASA і Caltech).

Зараз «Вояджер-1» рухається по гіперболічній траєкторії на третьою космічну швидкість, що гарантує, що він не повернеться в Сонячну Систему під дією гравітаційного тяжіння Сонця.



Рис.1.2 Сонячна система

У серпні 2009 року вона подолала рубіж 100 астрономічних одиниць (15 мільярдів кілометрів) і впритул підійшла до межі Сонячної системи. Радіосигнал з такої відстані йде близько 14 годин.

Вже давно вийшов запланований термін роботи обох Вояджерів, але, тим не менш, вони продовжують отримувати енергію від трьох **радіоізотопних термоелектричних генераторів**, які, як очікується, будуть виробляти достатню для досліджень електроенергію приблизно до 2025 року.

Технічні характеристики «Вояджер-1»

Маса - 721,9 кг

Потужність систем електроживлення - 420 Вт

Джерела живлення - 3 радіоізотопних термоелектричних генератора

Антен параболічна - 3,65 м;

Передавачі (кожен з них дубльований):

Потужність випромінювання (кожного окремо) - 23 Вт;

Частоти передавачів: 2295 МГц та 8418 МГц

Швидкість передачі даних на Землю:

а) 160 біт / с (при використанні 34-метрових антен мережі ДКС NASA)

б) 600 і навіть 1400 біт / с ((при використанні 70-метрових антен мережі ДКС NASA))

1.3 Джерела електроенергії

Головний блок не може вловлює радіохвилі, якщо вони слабкіше його порога чутливості. У інженерів є кілька способів утримати радіосигнал вище порога чутливості приймача. Найбільш очевидний - збільшити потужність передавача. На Землі це легко зробити - антени системи далекого космічного зв'язку NASA випромінюють в космос до полумегават енергії. А ось на космічному апараті бюджет енергії жорстко обмежений. Її виробляють або сонячні батареї, або радіоізотопні генератори.

І для отримання більшої потужності треба збільшувати їх масу. При цьому зростають також площа і маса радіаторів, відвідних надлишок тепла, що виробляється. Загальна маса апарату обмежена можливостями ракети-носія, а збільшити же масу окремої системи за рахунок інших найчастіше неможливо.

Космічні апарати - це дуже гармонійні технічні комплекси, де всі параметри жорстко зав'язані один на одного: не можна серйозно змінити одну систему, не вплинувши на параметри інших.

Сьогодні для супутників існує емпірична формула: «1 кг, 1 Вт, 1 літр», яка означає, що обсяг супутника масою в 1 тонну складе близько 1 кубометра, а його система енергоживлення здатна досягти потужності 1 кіловат.

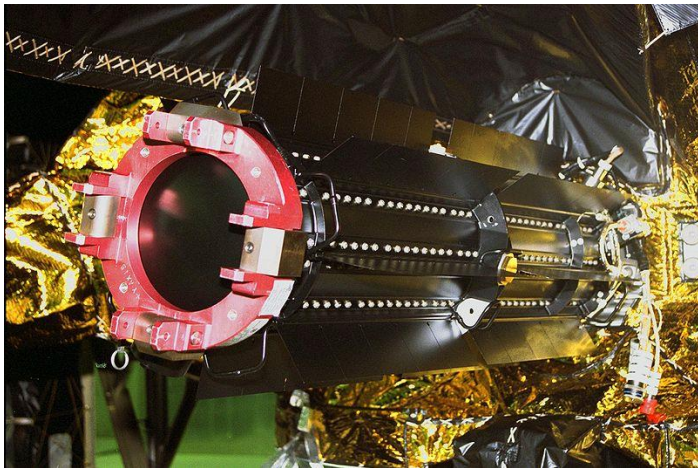


Рис.1.3 Один з радіоізотопних генераторів зонда Кассіні

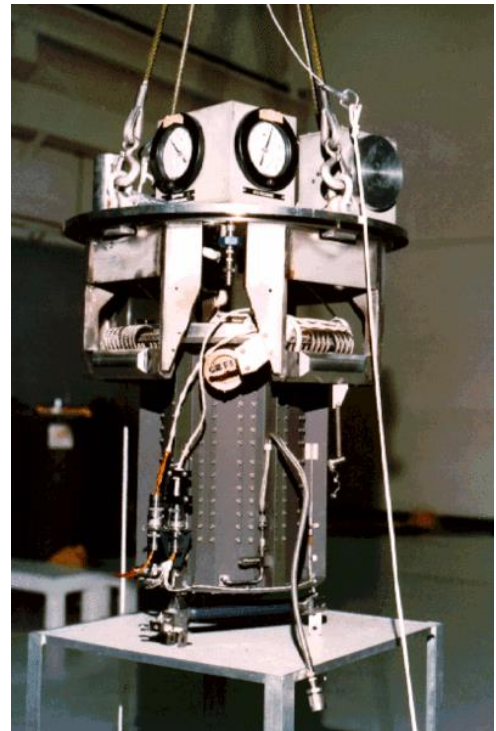


Рис.1.4 Радіоізотопний генератор КА «Вояджер-1»

1.4 Антенна система космічного апарату як найважливіший елемент забезпечення надійності ДКС

На Землі для далекого космічного зв'язку використовуються **дводзеркальні параболічні антени діаметром до 70 метрів**. Це вже близько до межі - сучасні конструкційні матеріали не дозволяють створювати на поверхні Землі набагато більші рухливі антени, оскільки вони деформуються під власною вагою. У майбутньому їх місцем стане навколоземну орбіту. В невагомості гігантська космічна антена може бути поступово зібрана з дуже легких ажурних елементів.

Розмір антени важливий і ще з однієї причини: **чим він більший, тим менше розходить в просторі пучок радіохвиль**. Звичайна дипольна антена, як у похідній рації, випромінює майже однаково на всі боки, і велика частина енергії втрачається даремно. Триметрова параболічна антена дозволяє затиснути пучок радіохвиль сантиметрового діапазону в межах кута порядку одного градуса, що дає вииграш в потужності в десятки тисяч разів. Але при цьому виникає необхідність точно націлювати антену на Землю.

Якщо відмовить система орієнтації, зв'язок з апаратом перерветься. Саме так загинув радянський міжпланетна станція «Фобос-1». У 1989 році на підльоті до Марса вона отримала невірну команду з Землі, в результаті чого стався збій в роботі бортового комп'ютера, апарат втратив орієнтацію,

сонячні батареї відвернулися від Сонця, а параболічна антена - від Землі. Оператори безуспішно намагалися налагодити контакт зі станцією.

Зв'язок - це критичне ланка у всіх міжпланетних місіях. Відмова інших систем часто вдається обійти, нехай іноді і ціною втрати частини наукових даних. Але якщо рветься зв'язок із Землею, то навіть справний в інших відносинах апарат фактично перестає для нас існувати. **Тому комунікаційна система повинна бути виключно надійна і на всіх сучасних космічних апаратах вона як мінімум продубльована.** При збої, які в більшості випадків призводять до втрати орієнтації апарату або його переведення в режим закрутки, **низькошвидкісна система зв'язку через всеспрямовану антену передасть на Землю параметри стану бортових систем і забезпечить прийом команд управління.** Коли працездатність апарату буде відновлена, зв'язок піде через швидкий канал передачі інформації.

Ненаправлена антена використовується не тільки при нештатних **ситуаціях**. Під час тривалих міжпланетних перельотів, коли станція перебуває в «сплячому» режимі, підтримувати зв'язок з високошвидкісного каналу не вигідно - інформації мало, а збереження точної орієнтації вимагає нехай і невеликого, але постійного витрати палива. З іншого боку, в складних міжпланетних місіях до орієнтації апарату можуть пред'являтися численні суперечливі вимоги: повернути сонячні батареї до світла, двигун - відповідно виробленому маневру, наукову апаратуру - на досліджуваний об'єкт. А якщо треба ще, наприклад, правильно зорієнтувати відокремлюється спусковий апарат або захисний екран, що оберігає від впливу космічного пилу, то зв'язок з вузькоспрямованому каналу в якісь моменти доводиться розривати. В цей час наукові дані записуються в пам'ять бортового комп'ютера, а по повільному резервного каналу зв'язку передається тільки життєво важлива телеметрична інформація. Якщо в потрібний момент апарат не зможе сам відновити швидкий канал зв'язку, йому допоможуть з Землі, відправивши потрібні команди, використовуючи низькошвидкісна канал.

Хорошим прикладом може служити японський дослідницький зонд "Хаябуса" (Hayabusa), який взяв в листопаді 2005 року проби ґрунту з астероїда Ітокава.

Через помилки в навігації він зробив незаплановану посадку на поверхню астероїда. Після зльоту вийшла з ладу система орієнтації і існувала реальна небезпека втратити апарат.

Однак багато разів резервована і гнучка система зв'язку, що має кілька типів антен і передавачів, дозволила відновити зв'язок з міжпланетної станцією. Замість відмовила системи орієнтації (з неї

випарувалося паливо) інженери вирішили використовувати для поворотів зонда ксенон (робоче тіло маршового іонного двигуна), потроху нацьковуючи його через клапани, - виконання завдання продовжилось.

Інший приклад - європейський зонд "Гюйгенс", який в січні 2005 року здійснив посадку на поверхню супутника Сатурна - Титана. В апарата було два незалежні канали зв'язку для паралельної передачі на різних частотах унікальних знімків і іншої інформації, одержуваної в ході спуску в атмосфері Титана. Спочатку планувалося, що ці канали будуть для надійності повністю дублювати один одного, але потім їх вирішили використовувати незалежно, щоб збільшити обсяг одержуваної інформації.

Однак жадібність до добра не доводить - через помилки в програмі управління один з каналів просто не включився.

В результаті пропала половина з 700 зроблених знімків, а також дані про швидкість вітру в атмосфері супутника. Звичайно, і отриманих знімків вистачило, щоб зробити безліч відкриттів, а дані про вітер вдалося відновити за допомогою земних радіоастрономічних мереж завдяки унікальній спостережній кооперації. Але тільки подумайте, що б сталося, якби відмовив канал зв'язку єдиним!

Обертові на низькій навколоземній орбіті (до 1000 кілометрів) апарати потрапляють в поле зору однієї станції управління тільки кілька разів на добу (зазвичай 4-6) і всього на кілька хвилин, тому їм програма роботи задається відразу на кілька годин або днів вперед.

Щоб збільшити кількість сеансів зв'язку, на Землі ставлять більше станцій, розташовуючи їх на істотному видаленні один від одного. За радянських часів існував навіть спеціальний космічний флот, судна якого працювали в різних частинах світу, забезпечуючи зв'язок із супутниками, пілотованими космічними кораблями.

Якщо з низьколетящим апаратом потрібно безперервний зв'язок, сигнал передається на нього через супутники-ретранслятори на геостаціонарній орбіті. Трьох таких апаратів, нерухомо висять над екватором на висоті 36 тисяч кілометрів, досить, щоб охопити практично всю територію Землі за винятком полярних районів.

Наприклад, **зв'язок з Міжнародною космічною станцією і американськими космічними човниками «Спейс Шаттл» відбувається через американські супутники-ретранслятори TDRS (хоча зв'язок через наземні станції теж використовується). Завдяки цьому екіпаж може зв'язатися з ЦУПом в підмосковному місті Королеві і в американському Х'юстоні, а також дзвонити додому і користуватися електронною поштою. Подібна система існувала і в нашій країні. Контакт зі станцією «Мир» на так званих**

«глухих витках» підтримувався через геостаціонарний космічний апарат «Луч».

Найвищою швидкістю міжпланетної передачі даних може сьогодні похвалитися апарат **Mars Reconnaissance Orbiter**, який вийшов на орбіту Марса 10 березня 2006 року. Він оснащений 100-ватним передавачем з триметрової параболічною антеною і може передавати інформацію на швидкості до 6 Vбіт / с. Доставити до Марсу більший і потужний передавач поки важко.

1.5 Перспективні напрямки в системах ДКС

Однак є принципово інший підхід до збільшення швидкості передачі даних - **використовувати замість радіохвиль оптичне випромінювання**. Довжина хвилі лазерного випромінювання в десятки тисяч разів менше, ніж в радіодіапазоні. **Тому розбіжність лазерного променя виходить значно меншою**. Це дозволить істотно підняти швидкість передачі даних при більш низькому енергоспоживанні. **Але у лазерної зв'язку є і недоліки: вона потребує більш точному націлювання передавача, і, крім того, на її працездатність істотно впливають погодні умови, в першу чергу хмари**. Тому міжпланетна лазерна зв'язок буде, швидше за все, підтримуватися з орбітальних апаратів.

Вперше лазерна зв'язок в космосі була здійснена 21 листопада 2002 року. Європейський супутник дистанційного зондування Землі SPOT 4, що знаходиться на орбіті заввишки 832 кілометри, встановив контакт з експериментальним космічним апаратом Artemis, які звертаються на висоті 31 000 км і передав знімки земної поверхні. А недавно Лабораторія Лінкольна в Массачусетському технологічному інституті (MIT) спільно з NASA приступила до розробки лазерної системи далекого космічного зв'язку. Перший тестовий комунікаційний лазер планувалося відправити до Марса в 2009 році. **Очікується, що цей 5-ватний передавач в період зближення планет забезпечить швидкість передачі даних до 30 Мбіт / с.**

1.6 Інтелект проти відстаней

Специфічна проблема в управлінні космічними апаратами пов'язана **з затримкою поширення радіохвиль на величезних міжпланетних відстанях**. Обмін сигналами з Місяцем займає більше 2 секунд. Чи зможете ви проїхати навіть по добре знайомій місцевості, якщо дорогу будете бачити з затримкою на секунду, а на повороти керма машина стане реагувати ще через секунду? Тим часом саме в таких умовах йшло управління з Землі радянськими «місяцехід».

До Марса радіосигнал йде від 3 до 22 хвилин в залежності від положення планети на орбіті.

При такій затримці неможливо оперативно втрутитися з Землі в такі відповідальні етапи місії, як корекція траєкторії польоту, вихід апарату на орбіту навколо планети, його входження в атмосферу, та й рухом по поверхні управляти не просто. Тому міжпланетні апарати стають все більш інтелектуальними і незалежними від контролю з Землі. Наприклад, одним з основних завдань зонда "Хаябуса" було відпрацювання методів автономної навігації з використанням іонних двигунів.

Дуже «розумними» є працюючі на Марсі американські планетоходи Opportunity і Spirit. На відміну від радянських «місяцехід», управління якими здійснювалося оператором з Землі практично в режимі реального часу, на борт марсоходів зазвичай відправляють тільки координати цілі, куди вони повинні дістатися. Бортовий комп'ютер, обробивши стереоскопічні знімки місцевості, самостійно оцінює розмір валунів, відстань між ними, нахил поверхні і за цими даними прокладає шлях. Минулого літа фахівці NASA оновили програмне забезпечення марсоходів - залили нову прошивку, кажуть комп'ютерники. Це підвищило їх автономність. Крім того, щоб не перевантажувати канал зв'язку, марсоходи тепер самі оцінюють, наскільки цікаві зроблені знімки, і визначають які з них і в якій черговості передавати на Землю.

2.1 Центр далекого космічного зв'язку

Національний центр управління та випробувань космічних засобів (НЦУВКЗ) - підвідомчий **Національного космічного агентства України (НКАУ)**, розташовується недалеко від **м. Євпаторія** (Крим, Україна).

Територія центру розділена на 3 майданчики. По суті справи є обсерваторією.

1. Управління польотами національних космічних апаратів різного призначення;
2. Надання послуг щодо управління КА в рамках міжнародних програм;
3. Контроль технічними засобами сейсмічної обстановки і інших геофізичних явищ на території України і світу;
4. Проведення перспективних наукових досліджень;
5. Надання широкого спектру послуг в різних сферах діяльності

2.2 Історія ЦДКС

У 1960 році був створений комплекс споруд ЦДКС в приморському рівнинному районі Криму неподалік від м Євпаторії. Технічну основу Центру

складав космічний радіотехнічний комплекс "Плутон", оснащений унікальними антенами, які не мають світових аналогів.

12 лютого 1961 року ЦДКС приступив до управління польотом першої в світі автоматичної міжпланетної станції **"Венера-1"**. У 1965 році було здійснено запуски апаратів **"Венера-2"** і **"Венера-3"**. Згодом було запущено цілий ряд космічних апаратів серій **"Луна"**, **"Венера"**, **"Марс"**, за допомогою яких відпрацьовувалися питання динаміки польотів та посадки на планети Сонячної системи, вивчення атмосфери планет, передачі інформації. Фахівці ЦДКС постійно здійснювали керування роботою космічних апаратів, отримуючи службову та наукову інформацію.

Багаторічний досвід керування автоматичними міжпланетними станціями, експлуатація наземних станцій далекого космічного зв'язку, досягнення в галузі електроніки, інформатики, радіотехніки, машинобудування та інших галузей науки і виробництва дозволили створити безпрецедентний науково-дослідний комплекс - радіоастрономічний телескоп **РТ-70**.

3 грудня 1978 року ЦДКС в г. Євпаторія є постійним учасником в реалізації космічних програм дальнього космосу.

31 серпня 1995 в 10 годині 50 хвилин було здійснено старт ракети-носія "Циклон", яка вивела на орбіту перший український національний супутник **"Січ-1"**, який призначений для оперативного отримання інформації з метою вирішення завдань дослідження Землі з космосу. Високопрофесійний колектив Євпаторійського Центру космічної телекомунікації в ході управління космічним апаратом "Січ-1" здійснив ряд наукових експериментів, які дозволили зробити багато відкриттів і відпрацювати нові технології, дати народному господарству інформацію, яка використовується в інтересах економіки.

У 1996 році, відповідно до Указу президента України в м Євпаторії на базі ЦДКС створений **Національний Центр Управління та випробування космічних засобів (НЦУВКЗ)**. Цей Центр призначений для управління космічними апаратами в рамках національних і міжнародних космічних програм.

2.3 Технічні засоби ЦДКС

- **70-м антена П-2500 (РТ-70)** на 3-му майданчику
- **32-м антена П-400** на 2-й «передавальній» майданчику
- **Дві антени по 25-м КТНА-200** на 1-му майданчику
- **Три антени АДУ-1000** (8 чашок по 16 метрів, «Плутон»), розташовані на 1-й і 2-й площадках
- **Здвоєний 50-см оптичний телескоп АЗТ-28** (Квантова оптична система «Сажень») на 1-му майданчику

- Телескоп АЗТ-8 ($D = 700$ мм, $f = 2400$ мм) на першу площадку

- Антена ТНА-400

2.3.1 Радіотелескоп РТ-70

Радіотелескоп П-2500 (РТ 70) - унікальний радянський радіотелескоп, один з найбільших в світі. Крім виконання звичайних радіоастрономічних завдань, пов'язаних з пасивним спостереженням власного випромінювання небесних тіл, **телескоп має перевагу в порівнянні із закордонними аналогами в тому, що комплекс включає в себе потужні передавачі, які дозволяють проводити активні космічні експерименти, пов'язані з випромінюванням в сторону досліджуваних об'єктів потужних електромагнітних потоків з подальшим аналізом прийнятих сигналів, і тут він не має собі рівних** - в світі всього два таких потужних радара - в Голдстоуні, Каліфорнія і під Євпаторією.

2.3.2 Історія створення

Для майбутніх радянських космічних програм можливості комплексу «Плутон» були обмежені. Був потрібен комплекс з більшою дальністю зв'язку і швидкістю передачі інформації. РНДІ КП розробив радіотехнічний комплекс «Квант-Д» з високоефективною антеною П-2500 з діаметром дзеркала 70 м. Основний програмою для якої була створена дана розробка була «Марс». У 1973 році почалося будівництво. На березі Чорного моря недалеко від п. Молочне (Євпаторія) був виритий шестиметровий котлован, в скелясте дно якого були вбиті 1004 палі - фундамент антени. Будівництво антени було закінчено в 1978 році. Введено комплекс в експлуатацію в 1980 році.

2.3.3 Конструкція

Радіотехнічний комплекс «Квант-Д»

Склад:

- радіопередаючий пристрій (РПУ) сантиметрового діапазону «Голіаф»;
- система первинної обробки телеметричної інформації З-73;
- командна радіолінія С-95;
- система радіоконтролю орбіти С-90;
- прийомні системи різних діапазонів;
- система єдиного часу еталонних частот на базі водневих стандартів Ч1-70, Ч1-80.



Рис.1.1. Радіотелескоп РТ-70

Характеристики

Антенне пристрій **живиться** роботу в діапазоні довжин хвиль до **8 мм (37,5 ГГц)**.

тип антени: двухзеркальна - по системі Грегорі

діаметр основного дзеркала - **70 м**;

діаметр допоміжного дзеркала - **7 м**;

висота антени - 86,36 метра;

вага рухомої частини: ~ 5000 тон;

ефективна площа поверхні антени:

передача - **2 000 м²** (в діапазоні 39 см) і 2: **600 м²** (в діапазоні 6 м);

прийом - **2500 м²**.

антенна система: повноповоротна;

За кутку місця - від 0 до 90 град;

По азимуту - ± 270 град;

ширина діаграми спрямованості - від 2 до 18 кутових хвилин в залежності від діапазону частот;

Точність наведення - до **10 кутових секунд**.

Швидкість руху антени:

А) в режимі швидкість «повільна»:

по азимуту

по куту місця - від 2,5угл. с / с до 1 кут.хв / с;

в режимі швидкість «швидка»:

Б) по азимуту - від 0,5 до 30 кут. хв / с;

по куту місця - від 0,5 до 15 кут. хв / с.

Сумарна шумова температура комплексу в сантиметровому діапазоні:

23 К.

Точність траєкторних вимірювань:

по дальності - до 20 метрів;

по швидкості - до 2 мм / с.

Швидкість прийнятої наукової інформації: до 131 кбіт / с.

РПУ «Голіаф»

режим роботи - безперервний;

несуча частота - 5010 МГц;

тип модуляції - ФМ, ЧМ, АМ, ЛЧМ;

дальність зв'язку -до 10 мільярдів кілометрів.

потужність передавального пристрою в ДМ і СМ діапазонах хвиль - до **100 КВт** при використанні одного підсилювача потужності на базі клистрона **КУ-342**, до **200 КВт** при використанні двох підсилювачів потужності і моста складання;

Робота на передачу в діапазонах 39 і 6 см. Ефективна площа антени: **2000 м² і 2600 м²** відповідно.

Під час роботи передавача в радіусі 100 метрів навколо антени напруженість електромагнітного поля становить небезпеку для життя і здоров'я. Будинки на самому майданчику від випромінювання захищені.

2.3. 4 Наукові завдання

З початку експлуатації в грудні 1978 року були проведені роботи:

- з досліджень планети Венера з використанням спускаються міжпланетних станцій, «Венера-11» і «Венера-12» при їх русі в атмосфері і з поверхні планети;
- щодо забезпечення управління автоматичними міжпланетними станціями «Венера-13» і «Венера-14», «Венера-15» і «Венера-16».

В ході робіт отримані перші кольорові фотографії поверхні і повна карта поверхні Венери;

- з досліджень планети Венера і комети Галлея автоматичними міжпланетними станціями «Вега-1 і 2»;

- з досліджень планет Марс з його супутником Фобос і Меркурія;
- в 1983-1991 р забезпечувалося управління орбітальної науковою станцією «Астрон», що проводила спостереження ультрафіолетових спектрів космічних об'єктів;
- 1988- 1989 р забезпечувалося управління орбітальними науковими станціями «Фобос-1» і «Фобос-2»;

У 1989-1999 р брав участь в міжнародній програмі з дослідження об'єктів Всесвіту за допомогою космічної обсерваторії «Гранат»;

1995-2000 р брав участь в комплексному міжнародному багатосупутниковому проект «Інтербол» з вивчення сонячно-земних зв'язків та фізичних процесів, що відбуваються в космічній плазмі; (Основний передавальної була АДУ-1000, резервними передають були РТ-70 і П-400).

У 1999, 2001, 2003, 2008 роках брав участь в проектах радіоповідомлень позаземним цивілізаціям: «Космічний зов-1», «Дитяче радіоповідомлення», «Космічний зов-2», АМФЕ.

З 1992 р бере активну участь в міжнародних радіоастрономічних і радіофізичних експериментах по вивченню планет сонячної системи, космічного сміття, визначення параметрів руху астероїдів (1992 рік - астероїд (4179) Таутатіс, робота спільно з Еффельсбергським радіотелескопом - перші неамериканських радіолокаційні спостереження астероїда), їх форми та зображення.

У 1995 р бере участь в спільному вивченні трьома радіобсерваторіями астероїда Голевка. За результатами якого було створено комп'ютерне зображення астероїда.

У 2005 році РТ-70 брав участь в роботах:

- картографування небесної сфери;
- підготовку і передачу повідомлення позаземним цивілізаціям;
- радіоінтерферометрів і радіолокацію
- робота по КА «Марс-експрес» і «Розетта»

2.3.5 Сучасний стан РТ-70

- 1) В 2007-2008 році велося управління супутником **EgyptSat-1**.
- 2) До 2009 року РТ-70 два рази в рік використовувався в рамках проекту «Астероїдна небезпека».
- 3) В період з 25 по 28 травня 2010 року на радіотелескопі **РТ-70** (м.Євпаторія) успішно проведено цикл робіт з прийому телеметричної інформації з КА «Mars-Express»
- 4) 24 червня 2010 року вирішено керувати КА «Фобос-Грунт» з Євпаторії.

2.3.6 Перспективні напрямки застосування РТ-70

- 1) Застосування РТ-70 в проектах Європейського космічного агентства «Марс-експрес» і Російського космічного агентства «Фобос-Грунт», «Спектр РГ», «Спектр-Р» [8].
- 2) Автономні радіоастрономічні дослідження на РТ-70 галактичних і позагалактичних об'єктів в безперервному випромінюванні.
- 3) Радіоінтерферометрія з наддовгими базами в локальних і глобальних радіоінтерферометричних мережах.
- 4) Наземно-космічна радіоінтерферометрія.
- 5) Радіолокація космічних об'єктів в режимі моностатичного локатора.
- 6) Радіолокація космічних об'єктів з використанням РСДБ-методів.
- 7) Просвічування сонячної корони, сонячного вітру, міжпланетного простору радіосигналами космічних апаратів далекого космосу.
- 8) Астрометрія, навігація, координатно-тимчасове забезпечення.

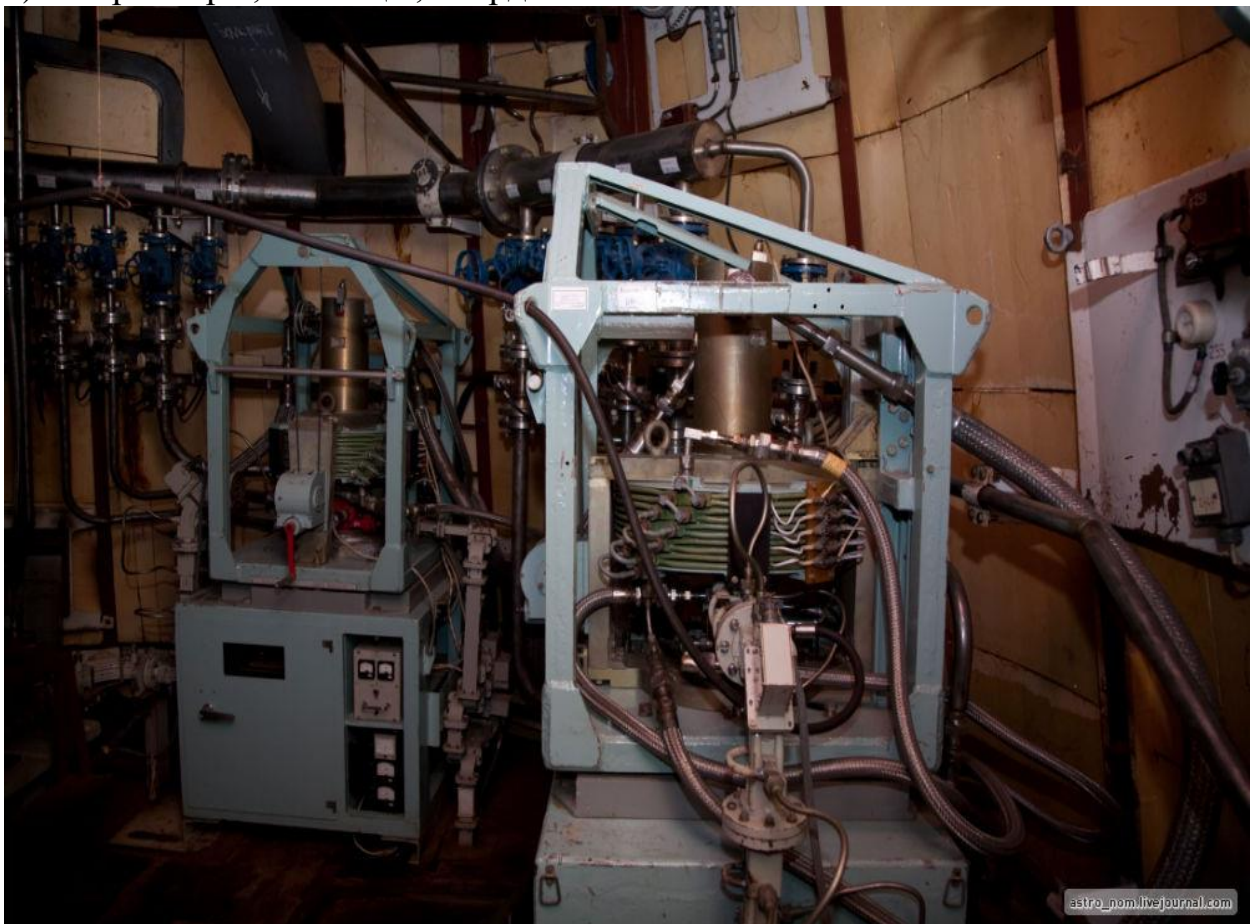


Рис.1.2. Передавач на 5 ГГц з потужністю 50

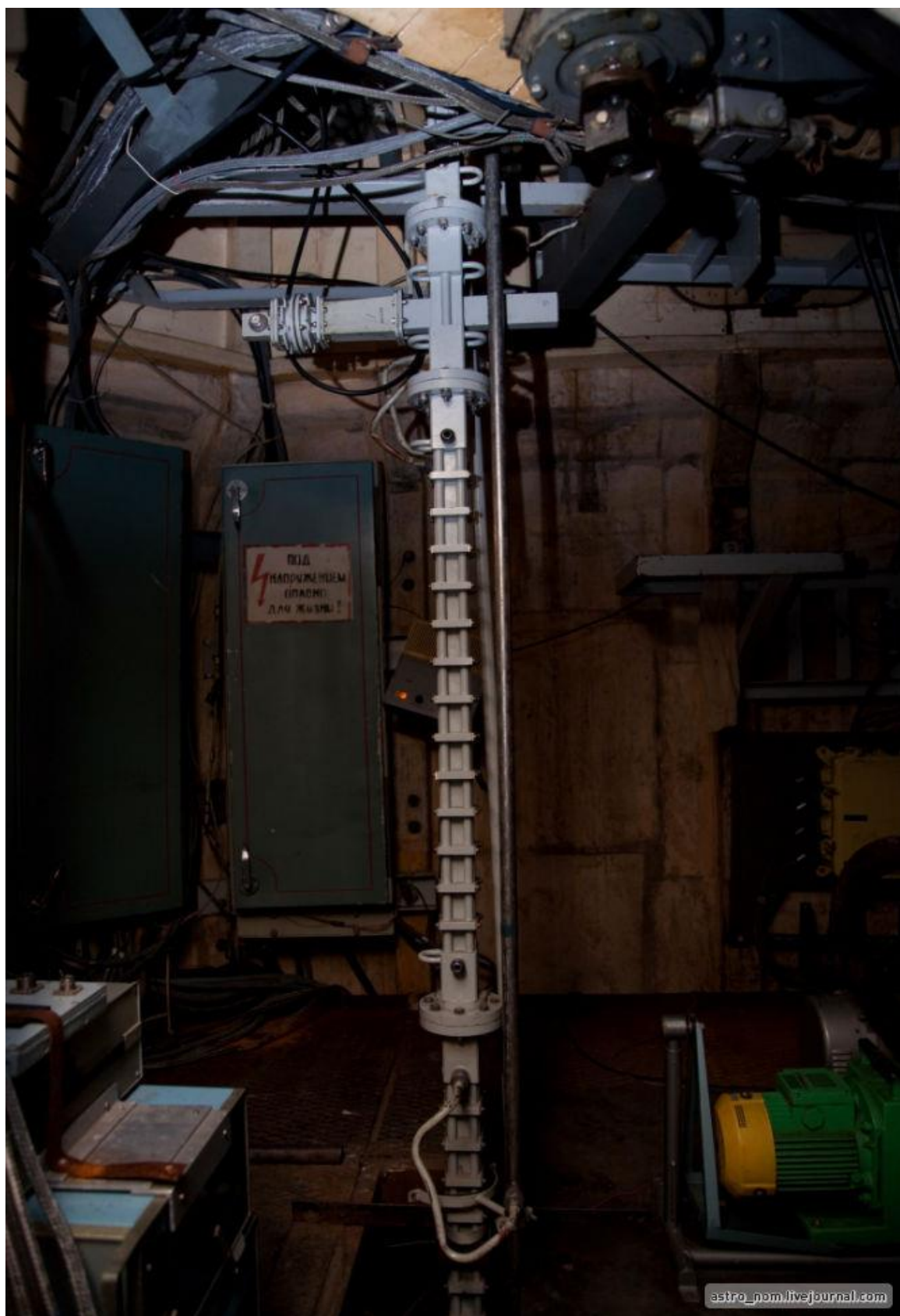


Рис.1.2. Водновод передавача на 5 ГГц

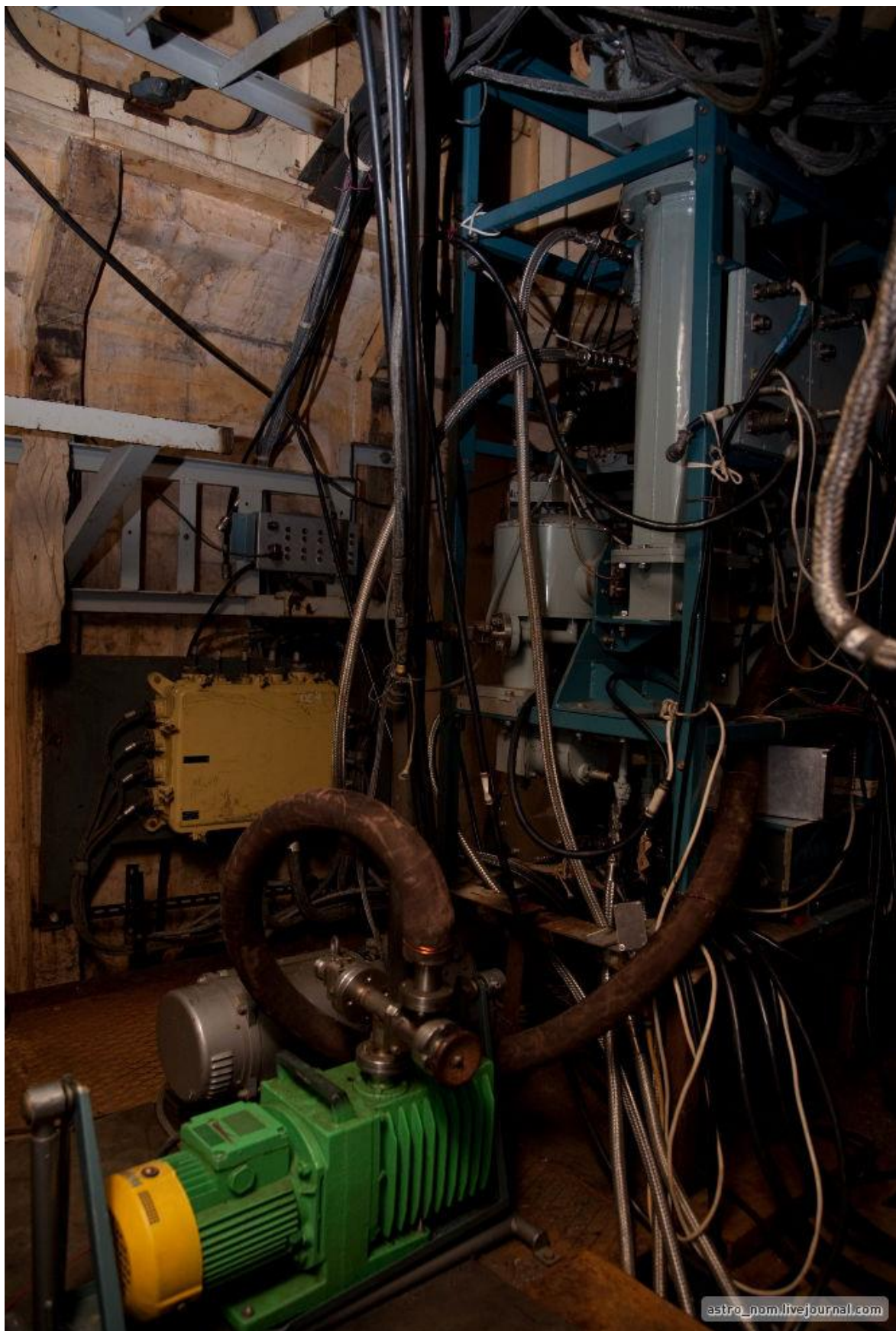


Рис.1.3. МШУ з гелієвим охолодженням

3. Передпроектна оцінка передачі інформації про лінії далекого космічного зв'язку

Для з'ясування специфічних умов роботи систем космічного зв'язку і що пред'являються до них вимог розглянемо енергетику космічних радіоліній зв'язку, займані смуги частот, а також вид і рівень перешкод.

3.1 Енергетика космічних радіоліній.

Аналіз радіолінії борт-Земля системи далекого космічного зв'язку виявляє специфічні умови їх роботи.

Енергетика радіолінії, що працює в умовах прямої видимості, характеризується співвідношенням

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пд}} \cdot G_{\text{пд}}}{4\pi d^2} S \frac{1}{L} \quad (1)$$

де $P_{\text{пр}}$ - середня потужність сигналу на вході приймача ЗС;

$P_{\text{пд}}$ - середня потужність сигналу передавача на вході антени КС;

$G_{\text{пд}}$ - коефіцієнт посилення антени передавача в напрямку прийому;

d - дальність зв'язку;

S - ефективна площа приймальної антени;

L - коефіцієнт, що враховує втрати потужності, обумовлене: нерівномірністю ДН антен приймача і передавача, впливом плазмових утворень працюючих реактивних двигунів космічного об'єкта, впливом іоносфери, поглинанням в тропосфері і ін.

Розглянемо випадок, коли частота $f_0 \approx 1$ ГГц ($\lambda=30$ см) і дальність зв'язку $d = 400$ млн. км., що забезпечує політ КА на планету Марс.

Значення $P_{\text{пд}}$ обмежується допустимою масою апаратури і витратою джерел живлення борту. Прийемо $P_{\text{пд}} = 10$ Вт. При ККД 10% (реального для даного діапазону хвиль) передавач буде споживати 100 Вт по постійному струму. Для забезпечення такої витрати потужності в районі Марса буде потрібно мати сонячні батареї з площею панелей близько $2,5 \text{ м}^2$.

Значення $G_{\text{пд}}$ лімітується розмірами антени і якістю стабілізації об'єкта. Антена з параболічним рефлектором діаметром $D_{\text{пд}} \approx 1,5$ м в обраному діапазоні має посилення $G_{\text{пд}} \approx 200$ і ширину ДН $2\theta_1 \approx 12^\circ$.

Спрямовані бортові антени не забезпечують зв'язку з об'єктами при аварійних ситуаціях. Тому використовуються і всеспрямовані антени, для яких $G_{\text{пд}} \approx 0,5 - 0,7$.

Зі співвідношення (1) видно, що при малій допустимій ЕІВП $= P_{\text{пд}} \cdot G_{\text{пд}}$ і великої дальності зв'язку d прийнятні значення потужності сигналу $P_{\text{пр}}$ на вході приймача можуть бути отримані лише за умови використання високоефективних прийомних антен великої площі S . Збільшення цієї площі лімітується точністю виготовлення і витримування основних геометричних розмірів антени, зменшенням ширини ДН, а також складністю і громіздкістю споруди.

Нехай $S = 600 \text{ м}^2$. Така антена являє собою складне технічне спорудження з рухомою частиною, що важить багато сотень тон. Вузька ДН (50°) вимагає точного прогнозування кутових координат КА до початку сеансу зв'язку, а також досконалого приводу, забезпечуючого стеження антени за КА в ході сеансу зв'язку.

Для обраних числових характеристик радіолінії з (1) маємо:

а) при роботі з спрямованої бортовий антеною

$$P_{\text{пд}} = \frac{10 \cdot 200 \cdot 600}{4 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 10^{22}} \approx 3 \cdot 10^{-19} \text{ Вт.}$$

б) при роботі зі всеспрямованою бортовою антеною

$$P_{\text{пд}} = \frac{10 \cdot 0,7 \cdot 600}{4 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 10^{22}} \approx 1 \cdot 10^{-21} \text{ Вт.}$$

Для порівняння зазначимо, що в звичайних приймачах наземного радіозв'язку потужність сигналу становить $P_{\text{пд}} = 10^{-8} - 10^{-12} \text{ Вт}$.

Таким чином, в радіолініях далекого космічного зв'язку потужність сигналу в $10^7 - 10^9$ разів менше звичайного.

3.2 Смуги частот, займані радіоліній

Смуга частот, яку займає випромінюваним сигналом Δf_s , і ширина смуги пропускання радіотракту на вході демодулятора Δf_t істотні для забезпечення ЕМС, і для роботи демодулятора в умовах перешкод. Смуга частот Δf_s може бути розділена на дві складові:

$$\Delta f_s = \Delta f_c + \Delta f_1, \quad (2)$$

де Δf_c номінальна ширина спектра радіосигналу; Δf_1 - зміна частоти радіосигналу, обумовлене нестабільністю частоти генератора, що задає, ефектом Доплера, а також іншими факторами.

Ширина спектра сигналу може бути представлена у вигляді

$$\Delta f_c = k_m \cdot F_m \quad (3)$$

де F_m - ширина спектра модулюючого сигналу; k_m - коефіцієнт, що залежить від виду модуляції радіосигналу.

Для радіоліній далекого космічного зв'язку характерні використання цифрових методів передачі інформації при низьких швидкостях $v_c = 1-150$ біт/с. При простому довічним кодуванні повідомлень і сигналів $F_m \approx 0,6-100$ Гц.

Якщо використовувати такі види модуляції, як ФМ-2 або амплітудна балансная (БМ), то для них $k_m = 2$, и $\Delta f_c \approx 1,2-200$ Гц.

Зміна частоти радіосигналу Δf_1 оцінюють як:

$$\Delta f_1 \approx 2(\nu_f + \nu_d) \cdot f_0 \quad (4)$$

де ν_f - відносна нестабільність частоти передавача; ν_d - відносна нестабільність частоти, обумовлена ефектом Доплера.

Звичайні засоби кварцовою стабілізації, прийнятні для бортової апаратури, дають $\nu_f = 10^{-5}-10^{-6}$. Застосування квантових еталонів частоти дозволяє зменшити цю нестабільність на кілька порядків.

Зміна частоти, обумовлене ефектом Доплера, залежить від швидкості руху, об'єкта, обертання Землі навколо своєї осі і навколо Сонця, а при посадці об'єкта на планету також і від обертання цієї планети навколо своєї осі і Сонця.

Так, наприклад, для радіальної швидкості руху об'єкта $v = 9$ км/с маємо:

$$\nu_d = 9/3 \cdot 10^5 = 0,3 \cdot 10^{-4}.$$

Для об'єкта на поверхні Марса, з урахуванням всіх факторів,

$$\nu_d \approx (0,2 \div 0,8) \cdot 10^{-4}.$$

$$\text{Як бачимо, } \nu_d \gg \nu_f \text{ отже } \nu_1 = \nu_d \quad (5)$$

Великий вплив ефекту Доплера є однією з важливих особливостей космічних радіоліній. Для $\nu_d = 0,5 \cdot 10^{-4}$, згідно (4) і (5), $\Delta f_1 \approx 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^9 = 10^5$ Гц і, отже, $\Delta f_1 \gg \Delta f_c$, а $\Delta f_s \approx \Delta f_1 \approx 2\nu_d \cdot f_0$.

Якщо вибрати ширину смуги пропускання радіотракта рівній $\Delta f_T = \Delta f_1$, то отримаємо, що значення Δf_T на кілька порядків перевищує практичну ширину спектра Δf_c . При цьому детектор буде поставлений в дуже погані умови, оскільки потужність шумів на його вході буде неприпустимо велика щодо потужності сигналу.

Вплив ефекту Доплера може бути зменшено шляхом прогнозування доплерівського зсуву частоти на підставі вимірювання частоти в попередні сеанси зв'язку та відомого з небесної механіки закону руху об'єкта. В такому випадку $\Delta f_T = \Delta f_c + \Delta f_2 = \Delta f_c + \Delta \nu_1 + \nu_{n2}$,

де $\Delta\nu_1$ - відносна помилка в прогнозі частоти сигналу; ν_{n2} - відносна нестабільність частоти гетеродина приймача.

З умови

$$\Delta f_2 \leq 10\Delta f_c \quad (6)$$

при $\Delta f_c = 1,2 \div 100$ Гц маємо

$$\nu_2 = \frac{10(1,2 \div 100)}{2 \cdot 10^9} = 6 \cdot 10^{-9} \div 0,5 \cdot 10^{-6}.$$

Як бачимо, навіть умова (6) може бути виконано лише при дуже малій помилку в прогнозі доплерівського зсуву частоти і високої стабільності частоти бортового генератора і гетеродина приймача. Для останніх потрібно відповідно мати $\nu_{n1} \approx 10^{-9}$ и $\nu_{n2} \approx 10^{-10} \div 10^{-11}$. Нехай $\nu_{n2} \approx 10^{-5}$, тоді для розглянутого прикладу $\Delta f_T \approx 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^9 = 20$ кГц.

3.3 Тип і рівень перешкод

Для радіоліній далекого космічного зв'язку характерна перешкода типу "білий шум". Спектральна щільність потужності такої перешкоди (енергетичний спектр) в смузі пропускання приймального пристрою є сталою і визначається за формулою

$$N_0 = k \cdot T_{\Sigma\Phi} \quad (7)$$

де $k = 1,3810^{-23}$ Дж/К - постійна Больцмана; $T_{\Sigma\Phi}$ - сумарна шумова температура всіх джерел перешкод.

Істотними джерелами перешкод (шумів) є антено-фідерні пристрої та перші підсилювальні каскади приймача (державні недержавні шуми), а також зовнішні джерела: Галактика, окремі світила (радіояскарі зірки. Сонце, Місяць), атмосфера. Земля і наземні споруди (при малих кутах місця лінії прийому) і ін.

Основними джерелами внутрішніх шумів є перші підсилювальні каскади. Використання сучасних МШУ дозволило знизити температуру внутрішніх шумів до декількох десятків і навіть одиниць кельвінів. При цьому істотне значення набувають і зовнішні шуми. Вибір оптимального діапазону радіохвиль власне і визначається умовою мінімізації сумарної шумовий температури джерел перешкод, урахуванням ККД передавального пристрою і ефективності передавальних і приймальних антен.

У розглянутому прикладі ($f_0 = 1000$ МГц) максимальна шумова температура Галактики $T_{\Sigma\Phi, \text{Гал}} \approx 30$ К в дуже вузьких інтервалах кута місця і часу доби. Шумова температура атмосфери, в залежності від кута місця, дорівнює $T_{\Sigma\Phi, \text{АТМ}} \approx 1 \div 25$ К.

Візьмемо для прикладу сумарну шумову температуру всіх іс-джерел перешкод $T_{\Sigma\Phi} = 50$ К, тоді, згідно (7),

$$N_0 = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 50 = 6,9 \cdot 10^{-22} \text{ Вт/Гц},$$

а при $\Delta f_T = 20$ кГц потужність шумів на виході лінійної частини приймача буде

$$N = 6,9 \cdot 10^{-22} \cdot 20000 = 1,38 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}.$$

Відповідно виходить, що відношення сигнал / шум по потужності на вході демодулятора:

а) при роботі з спрямованої бортовий антеною:

$$\frac{P_{\text{ПП}}}{N} = \frac{3 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-18}} \approx 0,22;$$

б) при роботі з ненаправленої бортовий антеною:

$$\frac{P_{\text{ПП}}}{N} = \frac{1 \cdot 10^{-21}}{1,38 \cdot 10^{-18}} \approx 0,7 \cdot 10^{-3}.$$

3.4 Оцінка гранично досяжної швидкості передачі інформації

К. Шенонем доведено, що для каналу, на вході якого діє перешкода типу "білий шум", пропускна здатність може бути оцінена за формулою

$$C = \Delta f_T \cdot \log_2 (1 + P_{\text{ПП}} / N) \quad (8)$$

де Δf_T - ширина смуги пропускання радіотракта; S - середня потужність сигналу на вході приймача; N - середня потужність шуму на вході приймача (в смузі Δf_T).

Випадок білого шуму якраз характерний для ліній далекого космічного зв'язку, і формула (8) для них може бути застосована. Якщо відношення сигнал / шум на вході приймача дуже мало, то (8) може бути наближено представлено у вигляді

$$C \approx \Delta f_T \cdot \frac{P_{\text{ПП}}}{N} \cdot \log_2 e \quad (9)$$

Враховуючи що $N = N_0 \Delta f_T$, а $\log_2 e \approx 1,45$ маємо

$$C \approx \frac{1,45 P_{\text{ПП}}}{N_0} \quad (10)$$

Формула (10) показує, що при дуже малому відношенні сигнал / шум на вході приймача пропускна здатність каналу практично не залежить від ширини його смуги пропускання, а визначається лише середньою потужністю сигналу і спектральної щільністю потужності шуму.

Для прикладу, розглянутого вище, маємо:

а) при роботі з спрямованої бортовий антеною

$$C \approx \frac{1,45 \cdot 3 \cdot 10^{-19}}{6,9 \cdot 10^{-22}} \approx 630 \text{ біт/с};$$

б) при роботі з ненаправленої бортовий антеною

$$C \approx \frac{1,45 \cdot 1 \cdot 10^{-21}}{6,9 \cdot 10^{-22}} \approx 2,1 \text{ біт/с};$$

Отримані цифри вказують на можливість забезпечення дальнього космічного зв'язку розглянутої радіолінії навіть при роботі зі всеспрямованою бортовий антеною. Однак, при цьому гранично досяжна швидкість передачі інформації мала і, отже, практично реалізована швидкість передачі інформації (реальна пропускна здатність лінії) повинна бути якомога ближче до граничної, а передані повідомлення повинні бути такі, щоб ця пропускна здатність використовувалася найбільш ефективно.

4. Техніко-економічна оптимізація тракту СВЧ приймальні і передавальної земної станції супутникового лінії зв'язку

Функції, що описують залежність вартості від технічного параметра компоненти системи - отримали назви:

функціонально вартісні моделі (ФВМ).

Математично ФВМ є функціональні залежності виду:

$$C = f(T_1, T_2, \dots, T_n); \quad (11)$$

де C - свартість об'єкта; T_i - технічні характеристики об'єкта;

Послідовність рішення задачі визначення параметрів передавальної ЗС.

1) Визначити вирази для ФВМ антени $C_a = f_a(D_a)$ і передавача $C_{nd} = f_{nd}(P)$.

2) Знайти функціональну залежність вартості ЗС від діаметра антени, потужності передавача $C_\Sigma = f_a(D_a) + f_{nd}(P)$.

3) З урахуванням виразів для ЕІВП:

$$E = P \cdot G_a \quad (12)$$

і коефіцієнта посилення антени:

$$G_a = D_a^2 \cdot \pi^2 \cdot KИП / \lambda^2 \quad (13)$$

знайти функціональну залежність вартості ЗС від діаметра антени, ЕІВП

$$C_\Sigma = f_a(D_a) + f_{nd}^*(D_a, E)$$

4) Знайти функціональну залежність оптимального діаметра антени

$D_a = f_d(E, \lambda, KИП)$, який буде відповідати мінімуму вартості ЗС C_Σ . Для цього необхідно вирішити рівняння:

$$\frac{dC_{\Sigma}}{dD_a} = 0, \quad (14)$$

5) Підставивши чисельні значення $E, \lambda, КИП$ в знайдену залежність визначити діаметр антени D_{opt} .

6) Підтвердити, що знайдене значення D_{opt} задовольняє умові мінімуму C_{Σ} . Для цього знайти $\frac{d^2 C_{\Sigma}}{dD_a^2}$, підставити чисельне значення діаметра антени і переконатися що

$$\left. \frac{d^2 C_{\Sigma}}{dD_a^2} \right|_{D_a=D_{opt}} > 0. \quad (15)$$

7) Визначити потужність передавача виходячи з виразів: $E = P \cdot G_{a,opt}$; $G_{a,opt} = D_{opt}^2 \cdot \pi^2 \cdot КИП / \lambda^2$.

8) Для знайдених значень D_{opt} і P знайти вартість ЗС використовуючи функціональну залежність $C_{\Sigma} = f_a(D_a) + f_{np}(P)$.

Послідовність рішення задачі визначення параметрів приймальної ЗС.

1) Визначити вирази для ФВМ антени $C_a = f_a(D_a)$ і приймача $C_{np} = f_{np}(T_{ш})$.

2) Знайти функціональну залежність вартості ЗС від діаметра антени, еквівалентної шумової температури приймача $C_{\Sigma} = f_a(D_a) + f_{np}(T_{ш})$.

3) З урахуванням виразів для добротності:

$$Q = G_a / T_{ш} \quad (16)$$

і коефіцієнта посилення антени:

$$G_a = D_a^2 \cdot \pi^2 \cdot КИП / \lambda^2 \quad (17)$$

знайти функціональну залежність вартості ЗС від діаметра антени, добротності

$$C_{\Sigma} = f_a(D_a) + f_{np}^*(D_a, Q).$$

4) Знайти функціональну залежність оптимального діаметра антени

$D_a = f_d(Q, \lambda, КИП)$, який буде відповідати мінімуму вартості ЗС C_{Σ} . Для цього необхідно вирішити рівняння:

$$\frac{dC_{\Sigma}}{dD_a} = 0, \quad (18)$$

5) Підставивши чисельні значення $Q, \lambda, КИП$ в знайдену залежність визначити діаметр антени D_{opt} .

6) Підтвердити, що знайдене значення D_{opt} задовольняє умові мінімуму C_{Σ} . Для цього знайти $\frac{d^2 C_{\Sigma}}{dD_a^2}$, підставити чисельне значення діаметра антени і

переконатися що
$$\left. \frac{d^2 C_{\Sigma}}{dD_a^2} \right|_{D_a=D_{opt}} > 0. \quad (19)$$

7) Визначити еквівалентну шумову температуру приймача скориставшись виразами: $Q = G_a / T_{ш}$; $G_a = D_a^2 \cdot \pi^2 \cdot КИП / \lambda^2$.

8) Для знайдених значень D_{opt} і T_{opt} знайти вартість ЗС використовуючи функціональну залежність $C_{\Sigma} = f_a(D_a) + f_{np}(T_{ш})$.

ВИСНОВКИ

Розглянутий приклад дозволяє сформулювати особливості радіолінії далекого космічного зв'язку:

- передача інформації можлива лише за умови використання високоефективних прийомних антен з площею, яка вимірюється сотнями квадратних метрів;
- потужність сигналу на вході приймача (на граничних дальностях сучасних радіоліній) дуже мала - 10^{-19} - 10^{-21} Вт;
- потужність сигналу на вході детектора може бути багато менше потужності шумів (сигнал "потопав" в шумах);
- доплерівські зрушення частот мають дуже великі значення.

Для того щоб при таких важких умовах забезпечити передачу прийнятної кількості інформації, потрібна реалізація останніх досягнень області теорії і практики радіотехнічних пристроїв (антен, малошумні підсилювачів, генераторів стабільних коливань, механізмів формування та обробки сигналів і ін.), А також в області теорії зв'язку. Остання повинна дати відповіді на питання:

- Які граничні можливості передачі інформації при зазначених умовах і як далеко відстають від цих меж основні характеристики реальних радіоліній?
- Які радіосигнали повинні формуватися на передавальній стороні, щоб забезпечити передачу максимальної кількості інформації по даній радіолінії?
- Як потрібно перетворювати передані повідомлення - первинні сигнали, що знімаються з датчикової (вимірювальної), фототелевізійна і іншої бортової апаратури, а також як повинні оброблятися повідомлення, одержувані на виході радіолінії, щоб при обраних її характеристиках отримати максимум інформації, що цікавить?

Наведений числовий приклад характеризує проблематику систем далекого космічного зв'язку.

У звичайних системах супутникового зв'язку дальність зв'язку зазвичай не перевищує $d \approx 3000 \div 50000$ км. Однак, ряд обставин ускладнюють передачу інформації і в цих системах.

До них відносяться:

1. Ряд КА можуть нести дуже малу корисне навантаження, внаслідок чого потужність передавальних пристроїв не перевищує одиниць ват.
2. Деякі КА об'єкти не стабілізуються і, отже, можуть використовувати лише малоефективні всеспрямовані антени.
3. Не представляється можливим використовувати приймальні антени великою ефективною площею (S), так як це економічно не вигідно при великому числі таких антен і технічно важко при великих кутових швидкостях об'єктів.
4. Недоцільно використовувати в ЗС дорогу апаратуру прогнозування доплеровських зрушень частот і високостабільні бортові і наземні еталони частот (використання GPS пом'якшує категоричність цього висновку)
5. На вході приймальних пристроїв цих радіоліній істотне значення можуть мати перешкоди, створювані іншими радіотехнічними засобами.

Крім того в даний час необхідно мати супутникові радіолінії великої пропускну здатності.

І, нарешті, оскільки число одночасно працюючих радіоліній безперервно зростає, то істотне значення набуває проблема економії смуги займаних ними частот.

Всі вищевказані обставини визначають необхідність реалізації в системах зв'язку з ШСЗ всіх досягнень теорії і техніки зв'язку.

Перелік посилань

1. Брагин А.С. Радиотелекоммуникационные системы. Часть 1. Тракты радиопередачи -К.:НТУУ “КПИ”, 2005. – 244 с.
2. Авдеєнко Г. Л. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт, практичних та семінарських занять з дисциплін «Передавальні та приймальні пристрої», «Телекомунікаційні тракти прийому та передачі сигналів» (електронна версія).
3. Брагін А.С. Передавальні та приймальні пристрої систем безпроводового зв'язку. Тестові завдання (електронна версія).
4. Радіопередавальні пристрої : навчальний посібник / В. М. Ткачук, С. М. Цирульник, Т. А. Петренко. – Вінниця : Т. П. Барановська, 2015. – 188 с.
5. Клоков В.В., Павликов С.Н. Устройства формирования и генерирования сигналов в системах подвижной радиосвязи: Учебное пособие. - Владивосток: изд-во МГУ. 2008. – 287 с.
6. Ворона В. А. Радиопередающие устройства. Основы теории и расчета. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007 – 384 с.: ил.
7. Дегтярь Г. А. Устройства генерирования и формирования сигналов: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – Часть 1. – 480 с.
8. Дегтярь Г. А. Устройства генерирования и формирования сигналов: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – Часть 2. – 548 с.
9. Садовомский А. С. Приемо-передающие радиоустройства и системы связи: учебное пособие для студентов специальности 21020165 / А. С. Садовомский. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 243 с.
10. Радиопередающие устройства: Учебник для вузов/ В. В. Шахгильдян, В. Б. Козырев, А. А. Ляховкин и др.; Под ред. В. В. Шахгильдяна. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.: ил.
11. Дингес С.И., Иванюшкин Р.Ю., Козырев В.Б., Кукк К.И., Шахгильдян В.В., Шумилин М.С. Радиопередающие устройства: учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 1200 с.
12. Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А., Рябов А.В., Головченко Е.В., Курносов Р.Ю. Радиопередающие устройства в системах радиосвязи: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2019. – 176 с.
13. Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А., Рябов А.В., Головченко Е.В., Курносов Р.Ю. Проектирование радиопередающих устройств для систем подвижной радиосвязи: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2019. – 116 с.
14. Салабай О. В. Ескізне проектування радіоприймальних пристроїв./Салабай О. В. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2012 – 76 с.

15. А. И. Фалько Основы радиоприема. Учебное пособие /СибГУТИ. – Новосибирск, 2012. – 259 с.
16. Пушкарев В. П. Устройства приема и обработки сигналов. Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 201 с.
17. Никитин Н. П. Устройства приема и обработки сигналов: учебное пособие для вузов / Н. П. Никитин. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009.
18. Аржанов В. А. Проектирование радиоприемных устройств: учеб. пособие / В. А. Аржанов, А. П. Наumenко. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 312 с.
19. Радиоприемные устройства: Учебник для ВУЗов / Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; под ред. Н. Н. Фомина. – М.:Горячая линия – Телеком , 2007. – 520 с.: ил.
20. Колосовский Е. А. Устройства приема и обработки сигналов. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 456 с.: ил.
21. Онищук А. Г. Радиоприемные устройства: учеб. пособие / А. Г. Онищук, И. И. Забеньков, А. М. Амелин. – 2-е изд., испр. – Минск: Новое знание, 2007. – 240 с.: ил. – (Техническое образование)
22. Садовомовский А. С. Приемо-передающие радиоустройства и системы связи: учебное пособие для студентов специальности 21020165 / А. С. Садовомовский. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 243 с.
23. Устройства приема и обработки сигналов: Учебное пособие для вузов/ В. С. Плаксиенко; Под ред. В. С. Плаксиенко – 2-е изд. Испр. – М.: Учебно-методический и издательский центр (Учебная литература), 2004. – 376 с.: ил.
24. Зырянов Ю.Т., Удовикин В.Л., Белоусов О.А., Курносов Р.Ю. Радиоприемные устройства в системах радиосвязи: учебное пособие – СПб.: Издательство «Лань», 2019. – 319 с.
25. Сборник задач и упражнений по курсу «Радиоприемные устройства»: Учеб. пособие для вузов. /Ю. Н. Антонов-Антипов, В. П. Васильев, И. В. Комаров, В. Д. Разевиг; Под ред. В. И. Сифорова. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с., ил.